



Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Тема работы
Влияние ионного ассистирования на свойства металлических покрытий

УДК 621.793.182.02:669.056.99

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A95	Алкенова Камилла Азаматовна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ Б.П. Вейнберга	Сиделёв Дмитрий Владимирович	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов Магеррам Али оглы	д.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Передерин Юрий Владимирович	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОЯТЦ	Селиваникова Ольга Валерьевна			



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ 03.10.2022 г. Селиваникова О.В.
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
0A95	Алкенова Камилла Азаматовна

Тема работы:

Влияние ионного ассистирования на свойства металлических покрытий	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№34-109/с от 03.02.2023 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.2023 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду; энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является хромовое покрытие, предметом исследования является совокупность структурных и функциональных свойств хромового покрытия на поверхности стального изделия после магнетронного распыления при разных режимах.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной</i></p>	<p>Анализ литературных источников по теме методов осаждения хромовых покрытий, включающий осаждение хромовых покрытий в плазме магнетронного разряда на стальных изделиях; постановка задачи исследования; исследование структурных, механических и функциональных свойств хромовых покрытий после магнетронного распыления; раздел</p>

<i>работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	«Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение»; раздел «Социальная ответственность».
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Титульный лист. 2. Актуальность. 3. Магнетронное распыление. 4. Цели и задачи. 5. Методика и оборудование. 6. Параметры осаждения покрытия. 7. Оборудование 8. Рентгеноструктурный анализ 9. Микроструктура. 10. Твёрдость. 11. Адгезия. 12. Износостойкость покрытий. 13. Оценка коррозионной стойкости 14. Заключение. 15. Список публикаций

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Гасанов Магеррам Али оглы, д.э.н., профессор ОСГН
Социальная ответственность	Передерин Юрий Владимирович, к.т.н., доцент ОЯТЦ

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	03.10.2022 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ Б.П. Вейнберга	Сиделёв Дмитрий Владимирович	к.т.н.		03.10.2022 г.

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А95	Алкенова Камилла Азаматовна		03.10.2022 г.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0A95	Алкеновой Камилле Азаматовне

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей в соответствии со штатным расписанием НИ ТПУ.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Районный коэффициент - 1,3; Коэффициент дополнительной заработной платы - 1,15; Накладные расходы – 16%
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Определение потенциального потребителя результатов исследования, SWOT-анализа разработанной стратегии
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Определение структуры работы. Расчёт трудоёмкости выполнения работ. Подсчёт бюджета исследования
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Расчитать показатели финансовой эффективности, ресурсоэффективности и эффективности исполнения

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. Альтернативы проведения НИ 4. График проведения и бюджет НИ 5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ 	
---	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН ШБИП	Гасанов Магеррам Али оглы	д.э.н.		13.03.2023

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A95	Алкенова Камилла Азаматовна		13.03.2023

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Обучающемуся:

Группа	ФИО
0A95	Алкеновой Камилле Азаматовне

Школа	<i>ИЯТШ</i>	Отделение школы (НОЦ)	<i>НОЦ Б.П. Вейнберга</i>
Уровень образования	<i>бакалавр</i>	Направление/специальность	<i>14.03.02 Ядерные физика и технологии</i>

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</i> – <i>опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</i> – <i>негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</i> – <i>чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</i> 	<p><i>Объектом исследования: покрытие Cr</i> <i>Область применения: машиностроение, энергетика.</i> <i>Рабочая зона: НОЦ Б.П. Вейнберга, лаборатория 101</i> <i>Размеры помещения: 138 м²</i> <i>Наименование оборудования рабочей зоны: ПЭВМ, спиральный насос, турбомолекулярный насос, криогенный насос, вакуумная камера.</i> <i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в зоне экспериментальной ионно-плазменной установки.</i></p>
<p>2. <i>Перечень законодательных и нормативных документов по теме</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – <i>ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</i> – <i>ГОСТ Р ИСО 6385-2016. Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем.</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – <i>физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</i> – <i>действие фактора на организм человека;</i> – <i>приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</i> – <i>предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</i>
<p>2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – <i>механические опасности (источники, средства защиты);</i>

	<ul style="list-style-type: none"> – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).
3. Защита в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	<ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	13.03.2023 г.
--	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Передерин Юрий Владимирович	к.т.н.		13.03.2023 г.

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A95	Алкенова Камилла Азаматовна		13.03.2023 г.

Реферат

Настоящая выпускная квалификационная работа содержит 116 страниц, 25 рисунков, 30 таблиц и 98 источников.

Ключевые слова: магнетронное распыление, ионное асистирирование, функциональные свойства, режимы магнетронного распыления.

Работа содержит введение, литературный обзор, экспериментальные методы и оборудование, экспериментальную часть, экономическую эффективности НТИ, социальную ответственность, заключение и список использованных источников литературы.

Объектом исследования является хромовое покрытие, **предметом** – структурные и функциональные свойства хромовых покрытий при использовании и без ионного асистирирования индуктивно связанной плазмы.

Цель работы – изучение влияния ионного асистирирования высокочастотной индуктивно-связанной плазмой на структурные и функциональные свойства хромовых покрытий, нанесенных с помощью магнетронного распыления.

В результате работы показано, что асистирирование высокочастотной индуктивно-связанной плазмой способствует улучшению твёрдости, износостойкости и коррозионной стойкости хромового покрытия на подложке из стали 12х18н10т при магнетронном распылении.

Оглавление

Введение.....	11
1. Свойства и характеристики хромовых покрытий	14
2. Методы нанесения тонких плёнок хрома	16
2.1 Электрохимический метод осаждения хромовых покрытий	16
2.2 Термическое испарение хрома.....	19
2.3 Вакуумно-дуговое испарение хрома	21
2.4 Магнетронное распыление хрома	24
3. Экспериментальные методы и оборудование.....	33
3.1 Вакуумная ионно-плазменная установка	33
3.2 Радиочастотный плазменный генератор РПГ-128	36
3.3 Метод пробоподготовки	37
3.4 Изучение кристаллической структуры.	39
3.5 Микроструктурный анализ (СЭМ).....	41
3.6 Метод определения коэффициента твёрдости	42
3.7 Метод определения коэффициента износа покрытия	43
3.8 Метод определения адгезии покрытия	44
3.9 Метод определения коррозионной стойкости покрытий.	46
4. Получение Cr покрытий и изучение их свойств	48
4.1 Кристаллическая структура покрытий	49
4.2 Микроструктура покрытий	50
4.3 Твёрдость и модуль упругости покрытий.....	52
4.4 Адгезия полученных образцов	53
4.5 Износ Cr покрытий	56
4.6 Коррозионные свойства покрытий.....	57

5	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	61
5.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения	62
5.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования	62
5.1.2	Анализ конкурентных технических решений	63
5.1.3	SWOT – анализ	65
5.2	Планирование научно-исследовательских работ	67
5.2.1	Структура работ в рамках научного исследования	67
5.2.2	Определение трудоемкости выполнения работ	68
5.2.3	Разработка графика проведения научного исследования	69
5.3	Бюджет научно-технического исследования	72
5.3.1	Расчет материальных затрат НТИ	73
5.3.2	Расчет затрат на специальное оборудование	74
5.3.3	Основная заработная плата исполнителей темы	75
5.3.4	Дополнительная заработная плата исполнителей темы	77
5.3.5	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	77
5.3.6	Накладные расходы	78
5.3.7	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	79
5.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	79
	Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	84
6.	Социальная ответственность	85

Введение.....	85
6.1 Организация рабочей зоны исследователя	86
6.2 Анализ вредных производственных факторов.....	88
6.2.1 Анализ вредных факторов.....	89
6.2.2 Анализ опасных факторов.....	96
6.3 Пожаро-взрывобезопасность	99
6.3 Анализ вероятных чрезвычайных и аварийных ситуаций.....	102
Вывод по разделу «Социальная ответственность».....	105
Заключение.....	106
Список используемой литературы.....	107

Введение

Хромовые покрытия широко используются в промышленности для улучшения износостойкости, коррозионной стойкости, твёрдости и других функциональных свойств различных изделий [1-2]. Существует множество методов, которые позволяют создавать хромовые покрытия с необходимыми свойствами. Одним из самых распространенных методов осаждения хромовых покрытий является электрохимическое хромирование [3-4]. Метод основан на процессе электролиза, в результате которого хром из раствора осаждается на поверхности изделия. Таким образом, данный химический процесс подразумевает использование кислот с содержанием хрома, которые имеют высокую токсичность. В результате, электролитическое хромирование требует особого контроля над каждой стадией процесса химической реакции и правильной обработки использованного сырья.

Альтернативным методом получения хромовых покрытий является метод магнетронного распыления. Этот физический метод распыления хрома позволяет получить высокочистое хромовое покрытие различной толщины на изделиях разной формы и габаритов. Кроме того, этот метод позволяет получать покрытия с более высокими функциональными свойствами и наносить разные по элементному составу покрытия. Однако, в случае хромовых покрытий их скорость магнетронного осаждения достаточно мала и находится в диапазоне от 1 до 10 нм/с [5]. Для устранения данной проблемы используют сублимацию материала мишени магнетронной распылительной системы [6]. В данном случае, магнетрон с сублимирующей или горячей мишенью представляет собой конструкцию, где дополнительно к процессу распыления используется сублимация материала мишени из-за ее нагрева при ионной бомбардировке и теплоизоляции от системы охлаждения. Эффективность использования «горячей» мишени была доказана рядом работ [7-10], исследовавших фундаментальные механизмы и возможности применения сублимирующих и испаряющихся (жидкофазных) мишеней.

Такой подход позволяет увеличить скорость осаждения на 1-2 порядка. Зачастую это решение приводит к ухудшению функциональных характеристик покрытий по причине более низкой энергии осаждающихся на поверхность подложки частиц (атомов и ионов материала мишени). Чтобы устранить данную проблему можно изменить магнетронную систему дополнив ее пучком ускоренных ионов, который инжектируется в зону горения плазмы магнетронного разряда [11]. Другой вариант, например, применение ионного ассистирования, когда используют высокочастотные источники индуктивно-связанной плазмы (ИСП), они способствуют повышению производительности процесса осаждения и сохранению или даже улучшению качества покрытий в том числе, что было показано в работах [12, 13] в отношении оксида железа (α - Fe_2O_3). Это объясняется тем, что при ионном ассистировании высокочастотным источником индуктивно-связанной плазмы будет происходить дополнительная ионизация рабочего газа и потока распылённого материала мишени, что приводит к увеличению ионного тока на поверхность изделия. Поэтому **целью** исследовательской работы является – изучение влияния ионного ассистирования высокочастотной индуктивно-связанной плазмой на структурные и функциональные свойства хромовых покрытий, нанесенных с помощью магнетронного распыления.

Для достижения данной цели были поставлены следующие **задачи**.

1. Подбор режимов магнетронного осаждения хромовых покрытий.
2. Проведение процесса магнетронного распыления хрома с использованием и без ионного ассистирования в случае горячей и холодной мишеней.
3. Исследование кристаллической структуры, микроструктуры, твёрдости и износостойкости, адгезии, коррозионных свойств полученных покрытий.
4. Анализ полученных результатов.

Объектом исследования является хромовое покрытие.

Предметом исследования являются структурные и функциональные свойства хромовых покрытий при использовании и без ионного ассистирования индуктивно связанной плазмы.

1. Свойства и характеристики хромовых покрытий

Хром в окружающей среде существует в виде элементного хрома и его соединений (Cr (III), либо Cr (VI)) [14]. Добывают этот серебристо-стальной металл из руды под названием хромит, которая состоит до 68% из хрома. Так как чистый хром обладает значительной прочностью сцепления со сталью, химической стойкостью и высокой твердостью, покрытия, получаемые ионным распылением хрома, имеют практически те же свойства и характеристики.

Основные характеристики хромовых покрытий представлены в таблице 1. Хромовые покрытия представляют собой объемно-центрированную кубическую кристаллическую решетку с параметром решетки равным 2,885 Å.

Кроме того, хромовые покрытия отличаются высокими коррозионной стойкостью, износостойкостью, твердостью и другими механическими свойствами. Например, твердость хромовых покрытий при магнетронном распылении на постоянном токе по шкале Виккерса в среднем составляет 6-8 ГПа [15]. Температура плавления чистого хрома достигает 1890°C.

Таблица 1 – основные параметры хромовых покрытий

Параметр	Значение
Структура решётки	кубическая объёмно-центрированная
Параметр решётки	2,885 Å
Температура плавления, °C	1890
Твёрдость, ГПа	6-8
Коэффициент трения, μ (при комнатной температуре с влажностью 40%, при нагрузке 20-150 Н)	0,15-0,16

Хром относится к группе переходных металлов и обладает высокой устойчивостью к взаимодействиям различных сред (воздуха, воды, щелочей). Таким образом, хром химически не активный металл. В сталях обычно используют до 30-40% хрома. Кроме того, хром способен уменьшать активность окисления железа, например, при 1600°C параметр взаимодействия стали с кислородом, характеризующий способность железа вступать в химическую реакцию с кислородом, составляет -0,055 [16].

При соединении хрома с азотом, углеродом и другими элементами увеличивается хрупкость и уменьшается пластичность хрома. Технический загрязненный хром самый твердый из всех металлов, но при этом считается и самым хрупким материалом, у которого практически отсутствует пластичность [17]. Однако, посредством переплавки хрома электронным лучом в вакууме возможно получение пластичного хрома. В основном, соединения хрома применяются в промышленности для производства сплавов, обработки металлов, добавки к красителям и для коррозионного контроля. Благодаря своим уникальным свойствам хром также используют в машиностроении в качестве напыляемого металла, для улучшения износостойкости и прочности деталей. Как легирующий металл хром применим для создания жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов. Технология нанесения тонких плёнок хрома в промышленности и энергетике применяется как метод по улучшению коррозионной устойчивости и износостойкости металлических изделий.

2. Методы нанесения тонких плёнок хрома

Основные методы, которые применяют для нанесения хромовых покрытий на изделия подразделяются на:

- 1) методы, основанные на химических реакциях. К ним относят газофазное осаждение пленок, жидкофазное осаждение пленок.
- 2) электрохимические методы, основанные на процессе электролиза при пропускании электрического тока через раствор электролита. К ним относят электролиз и электрофорез.
- 3) методы, основанные на физическом испарении или распылении материалов из источника. К ним относят термическое испарение или ионное распыление материала.

Чтобы получить качественное хромовое покрытие следует определить метод, который будет использоваться в данном исследовании. На сегодняшний день для получения хромовых покрытий в основном используют такие методы, как вакуумно-дуговое распыление, термическое испарение и магнетронное напыление [18]. По этой причине рассмотрим особенности данных методов и определим эффективную методику получения качественных покрытий из хрома для металлических поверхностей, в нашем случае для стали марки 12х18н10т.

2.1 Электрохимический метод осаждения хромовых покрытий

Одним из химических методов нанесения хромовых покрытий является электролитическое хромирование. Метод основан на процессе электролиза, в результате которого металл осаждается на поверхности катода [19-21]. Для данного метода характерно протекание химической реакции вблизи поверхности образца, в результате которой происходит осаждение одного или более продуктов реакции на его поверхности.

Электролитическое хромирование построено на принципе электролиза металлов (рис. 2.1). В процессе обработки электрический ток подаётся через электролит, помещенный в стеклянную ёмкость, представляющий собой специальный раствор из солей хрома, кислоты или щелочи. По мере прохождения тока из электролита выделяются катионы хрома, которые в дальнейшем осаждаются на обрабатываемой поверхности подложки у катода. Электролитическое хромирование применяется для создания декоративных и функциональных хромовых покрытий различной толщины.

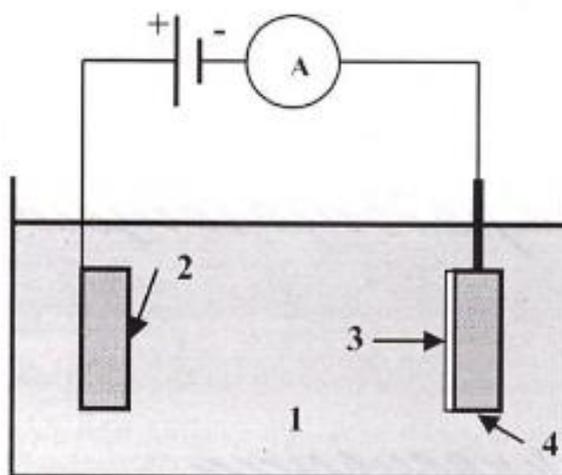


Рисунок 2.1 – Схема установки для электролитического хромирования: 1 - раствор электролита; 2 – катод; 3 – подложка; 4 – анод [22]

Преимуществом хромирования служит возможность осуществления наращивания хромом как термически обработанных образцов, так и образцов, которые не имеют нарушений в структуре поверхности основного материала [23].

Электрохимическое осаждение хрома в основном применяется для улучшения износостойкости образца, как до, так и после его использования, а также для повышения коррозионной устойчивости металлического изделия. Так, например, были изучены процессы роста конверсионных покрытий на основе трехвалентного хрома, осаждаемого на оцинкованной стали [24]. Результаты исследования показывают, что целостность двухслойных слоев,

при их осаждении в течении 50 секунд, обеспечивает повышенную коррозионную стойкость.

Свойства хромового покрытия в значительной степени зависят от режима осаждения на поверхность. Изменяя только плотность тока и температуру раствора электролита, можно изменять твёрдость покрытия в пределах HB 450 – 1000 [25]. Для решения данной проблемы ученые из института полимерной технологии и материаловедения университета Лафборо из Лестершира рассматривали замену хроматов, используемых в пассивации цинка. Авторы статьи предполагают, что помимо замены хроматов на шестивалентный хром, существует возможность полной замены хрома на другое вещество, которое будет экологично-дружелюбным и идентичным свойствам, которые придают покрытия из хрома. Однако конкретных примеров данному предположению найдено не было.

При проведении электролитического хромирования на основе высоко валентных солей хрома, которые имеют высокую токсичность, используются электролиты в виде агрессивных жидкостей (H_2CrO_7 , H_2CrO_4), кроме того, в растворе обычно присутствуют добавки активных ионов фтора, фторида кремния и сульфатов [26]. Даже несмотря на их разбавление они остаются активными и агрессивными. Необходимость добавок объясняется тем, что в процессе электрохимического хромирования происходит более легкое выделение водорода, а не хрома. Наличие в растворе таких смесей и добавок приводит к выделению при электролизе газов, оказывающих пагубное влияние на окружающую среду. Вредные химикаты, которые являются продуктами реакции при электрохимическом осаждении хрома, распространяются не только в ванне и окружающей среде, но и способны осаждаться на поверхности используемого для осаждения металлического изделия. Таким образом, метод электролитического хромирования весьма сложен и требует аккуратности и контроля над каждой стадией процесса химической реакции. В результате, исследователи все больше полагаются на физические методы нанесения хромовых покрытий.

2.2 Термическое испарение хрома

Термическое испарение хрома позволяет получать покрытия с использованием нагрева материала выше температуры плавления [27]. При таком условии возможно образование потока частиц при испарении твёрдого материала (хромовой мишени) с достаточной концентрацией.

Как известно, рабочая камера вакуумной установки для термического напыления обычно представлена в виде цилиндрического стеклянного колпака, который устанавливается на опорной плите (рис. 2.2). Между колпаком и плитой располагается резиновая прокладка, которая создаёт герметичное вакуумное плотное соединение. Внутри рабочей камеры помещается нагреватель подложки, подложка, закрепленная на держателе, испаритель для нагрева материала, которым необходимо напылить на подложку. Распыляемый материал обычно помещается в тигель [28].

Между испарителем и подложкой устанавливается заслонка, необходимая для прекращения подачи испаряемого материала на подложку. В рабочей камере получают вакуум не выше 10 Па, так как при более высоких давлениях скорость испарения материала уменьшается.

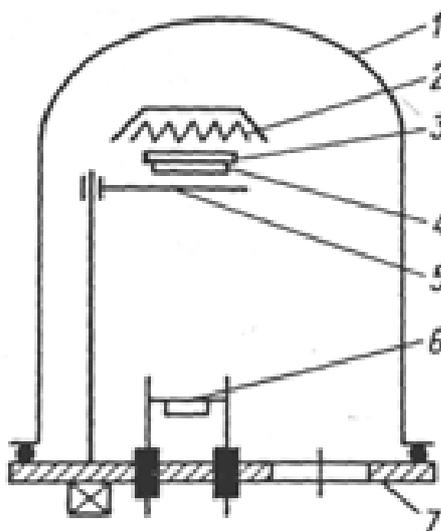


Рисунок 2.1 – Схема процесса термического напыления: 1 – колпак, 2 – нагреватель подложки, 3 – держатель, 4 – подложка, 5 – заслонка, 6 – испаритель для нагрева, 7 – опорная плита [29]

В качестве источников нагрева испаряемого материала (испарителей) применяют различные резистивные, электронные и световые лучи, индукционные и дуговые источники. Выбор конструкции испарителя зависит от того, в каком состоянии находится испаряемый материал (гранулы, слитки, порошок, проволока), а также от таких особенностей испарения вещества, как испарение из жидкой фазы или сублимация, смачиваемость испарителя, химическая активность к материалу испарителя [30].

Процесс термического напыления материала в вакууме состоит из нескольких стадий: испарение вещества, распространение паров испаряемого вещества, конденсация паров испаряемого вещества на подложке и образование плёночной структуры. Испарение вещества происходит при его нагревании, когда кинетическая энергия атомов и молекул этого вещества становится достаточной для того, чтобы эти частицы вырвались с поверхности мишени в атмосферу рабочей камеры. С повышением температуры нагрева энергия частиц и их количество увеличивается, в результате все больше частиц вылетает в рабочую камеру. Твёрдые вещества обычно при нагревании расплавляются, а затем переходят в газообразное состояние. Однако, некоторые из них способны переходить сразу в газообразное состояние, таким образом пропуская жидкую фазу. Этот переход также называют сублимацией. Конденсация паров на подложке подразумевает переход газообразного материала в твёрдое состояние на поверхности подложки. Таким образом, происходит образование плёнки, которое напрямую зависит от температуры подложки. Важным аспектом на этой стадии является наблюдение за температурой подложки, которая не должна превышать критической температуры. Если температура подложки будет выше критической, то атомы материала, летящие со стороны испарителя, будут отражаться от подложки.

Для напыления хрома термическим испарением используются температуры испарения от 1400°C и выше, при давлении паров испаряемого материала не ниже 1 Па [31]. Следует отметить, что на процесс образования плёнки оказывает значительное влияние содержание в камере остаточных

газов. В основном молекулами остаточного газа могут быть молекулы воды, азота и кислорода. Эти газы способны реагировать с нанесённой на подложку плёнкой и образовывать оксидный слой. В случае хрома, который легко окисляется в атмосфере, адгезия хромовой плёнки будет лучше, чем у металла, например, серебро, который не поддаётся окислению.

Достоинством термического испарения является высокая скорость испарения веществ, получаемая за счет подачи высокой мощности на испаритель. Также метод удобен для контроля скорости испарения материала, так как можно изменять подаваемую на испаритель мощность в пределах от 0,5 до 200 кВт [32]. В таком случае плотность потока испаренных частиц материала составляет от 10^{16} до 10^{22} частиц/(см²·с), а их средняя кинетическая энергия находится в диапазоне $(0,32...0,8) \cdot 10^{-19}$ Дж. Помимо этого, термическим испарением можно обрабатывать группу деталей, а также напылять на них покрытия. Существует также возможность наносить нитридные, оксидные и другие плёнки, получаемые за счет подачи реактивного газа в рабочую камеру.

Недостатками данного метода являются трудность испарения тугоплавких металлов и сложных соединений, возможно появление дефектов на поверхности покрытия. Кроме того, процесс не позволяет получать высокую адгезию плёнок к подложке и имеет невысокую воспроизводимость свойств плёнок. Покрытие может быть подвержено загрязнению со стороны испарителя, который может испускать помимо распыляемого материала, тот материал из которого он состоит. Существенным недостатком также является необходимость в замене испарителя, который имеет непродолжительный срок службы.

2.3 Вакуумно-дуговое испарение хрома

Вакуумно-дуговое испарение применяется для нанесения покрытий в вакууме, с помощью испарения материала катода подвижными пятнами

вакуумной дуги сильноточного низковольтного разряда, удерживаемого магнитным полем [33]. Для протекания процесса вакуумно-дугового испарения хрома необходимо возникновение вакуумно-дугового разряда, особенностью которого является возможность его существования без использования рабочего газа. Этот разряд существует в вакууме и продуктах эрозии одного из электродов, в частности катода для катодной формы дуги. Именно в зоне катодного пятна протекают такие процессы как испарение материала катода, ионизация, превращение в плазму и ускорение ионов.

В процессе горения дугового разряда катодные пятна находятся в постоянном движении, но на самом деле это движение связано с погасанием одних пятен и возникновением новых вблизи от первых. Как правило, катодом является само испаряемое вещество (мишень из хрома), либо сверху на катоде может располагаться пластина испаряемого материала (хрома), которая электрически контактирует с ним (рис. 2.3). В качестве анода выступают стенки вакуумной камеры или отдельный анод. Зажигание электрической дуги происходит при контакте поджигающего электрода с катодом из испаряемого материала, что приводит к возникновению короткого замыкания. В данном случае катод подвергается локальному разогреву в пятне контакта и возникает яркое свечение. При отводе поджигающего электрода на расстояние около 5 мм возникает устойчивый дуговой разряд, характеризующийся высокой силой тока (150-300 А) низким напряжением (20-30 В). Для ионизации и ускорения ионов плазмы на детали подается отрицательный потенциал. В случае высокого отрицательного потенциала ($1-1,5 \cdot 10^3$ В) происходит эффективная ионная очистка поверхностей. После очистки значение потенциала снижается до 100 В, и в этих условиях производится процесс нанесения (конденсации) покрытия.

Преимуществом вакуумно-дугового испарения является создание покрытий сложного состава, так как метод позволяет использовать несколько катодов, которые могут быть изготовлены из различных материалов. Помимо

этого, если требуется получить покрытие из карбидов, нитридов или оксидов металлов, в камеру возможна подача реактивный газ.

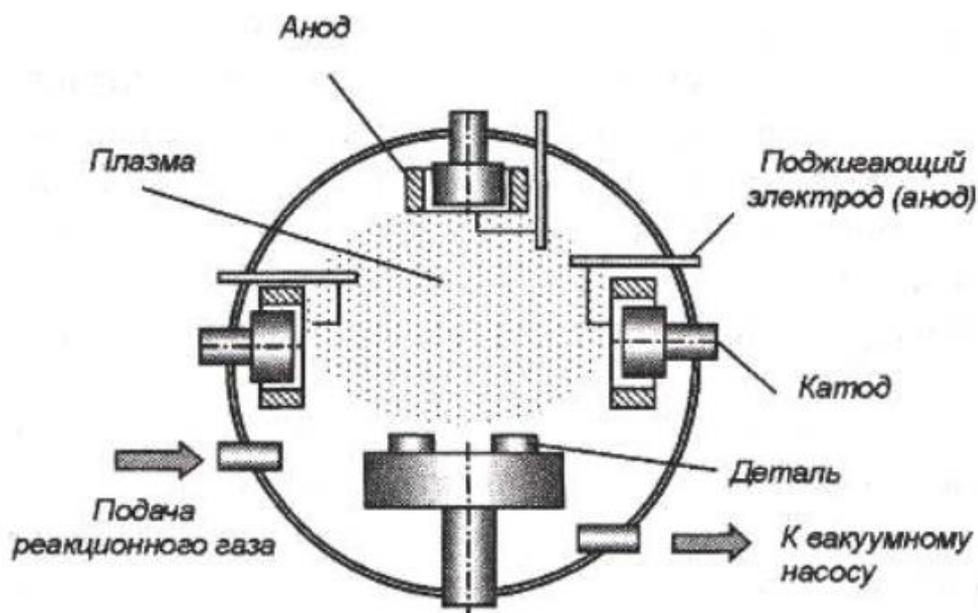


Рисунок 2.2 – Схема нанесения покрытий способом дугового испарения [34]

Получаемые вакуумно-дуговым испарением покрытия имеют высокую прочность сцепления с подложкой, дисперсную структуру и малую пористость. Так, например, образцы циркалоя-4 с покрытием Cr полученные методом вакуумно-дугового плазменного осаждения и исследованные на коррозионную стойкость, микроструктуру и окислительные свойства показали плотную структуру покрытия с отсутствием дефектов [35]. Скорость коррозии покрытия Cr показала значительно низкие значения, чем у Zircaloy-4. Кроме того, системы на основе вакуумно-дугового испарения материалов обеспечивают скорости осаждения до 2-3 мкм/мин [36-38]. Также при вакуумно-дуговом испарении адгезия покрытия к материалу подложки в 1,5-2 раза выше, чем при гальваническом нанесении покрытия.

Главным недостатком данного метода является наличие капель в газовой фазе, наиболее вероятной причиной образования которых является присутствие в объеме катода растворенного газа, вследствие чего при кипении образуются газовые пузыри, интенсивно выходящие на поверхность и

приводящие к разбрызгиванию расплавленных макрочастиц катода. Таким образом, при осаждении на подложку капли нарушают однородность плёнки и ухудшают ее свойства. Для устранения капель в газовой фазе применяют сепарацию газового потока в электрическом и магнитном полях, используют дегазированные катоды, оптимизируют режимы испарения.

Электродуговое осаждение широко применяется для нанесения на поверхность режущих инструментов износостойких и защитных покрытий, значительно продлевающих срок его службы. При помощи данной технологии может быть синтезирован широкий спектр сверхтвёрдых и нанокompозитных покрытий, имеющих в своем составе хром и его соединения [39].

2.4 Магнетронное распыление хрома

Магнетронное распыление – это физический метод нанесения материала в процессе ионной бомбардировки материала мишени высокоэнергичными ионами инертного газа и осаждения его атомов и молекул на образце (подложке) [40]. Рабочие параметры магнетронной распылительной системы подбираются индивидуально к каждой системе, так как существует большое количество их разновидностей в зависимости от типа мишени, геометрических параметров. По этой причине, магнетронные распылительные системы принято делить на 4 типа.

1. По виду мишени (планарные, цилиндрические и конические);
2. По степени ионного воздействия на подложку (сбалансированные и несбалансированные);
3. По виду магнитной системы (перемещаемая или стационарная);
4. По виду источника питания (постоянный, импульсный, переменный или высокочастотный ток).

Основные параметры осаждения покрытий при магнетронном распылении представлены в таблице 2.1. Энергия бомбардируемых катод ионов составляет примерно $\sim 0,3-1$ кэВ, а коэффициент распыления

большинства металлов составляет от 1 до 5, это значит, что на распыление тратится лишь незначительная доля энергии падающих ионов, а остальная её часть рассеивается, вызывая нагрев катода.

Таблица 2.1 – параметры осаждения покрытий при магнетронном распылении [41]

Параметр	Значение
Давление, Па	10^{-2} - 1
Напряжение, подаваемое на мишень, В	300-700
Удельная мощность, Вт/см ²	~100
Плотность ионного тока, мА/см ²	200
Расстояние до подложки, см	5-20
Скорость осаждения, нм/мин	до 3600
Степень использования материала мишени, %	до 80

Классическая конструкция магнетронной распылительной системы (МРС) представляет собой магнитопровод и систему из постоянных магнитов, позволяющих создать арочное магнитное поле над поверхностью катода. Такое поле захватывает электроны, находящиеся над поверхностью катода, тем самым локализуя процесс ионизации атомов вблизи поверхности мишени. Кроме того, вокруг катода располагается электростатический экран, который необходим для того, чтобы избежать процесса формирования паразитного

разряда на боковых поверхностях катодного узла. Анодом в такой системе служат стенки вакуумной камеры.

Положительные ионы, образованные в результате столкновения ускоренных свободных электронов с рабочим газом, при бомбардировке поверхности катода начинают процесс его распыления, при этом образуется ионный ток с большой плотностью и удельной мощностью. Таким образом формируется аномальный тлеющий разряд. Такой разряд локализован у поверхности катода, а электрическое поле вызывает эмиссию и направленное движение к аноду электронов с поверхности катода. Это объясняется тем, что эмитируемые с поверхности катода электроны захватываются электрическим и магнитным полями. Таким образом, траектория движения электрона состоит из периодически повторяющихся фаз и представляет собой циклоиду (рис.2.4).

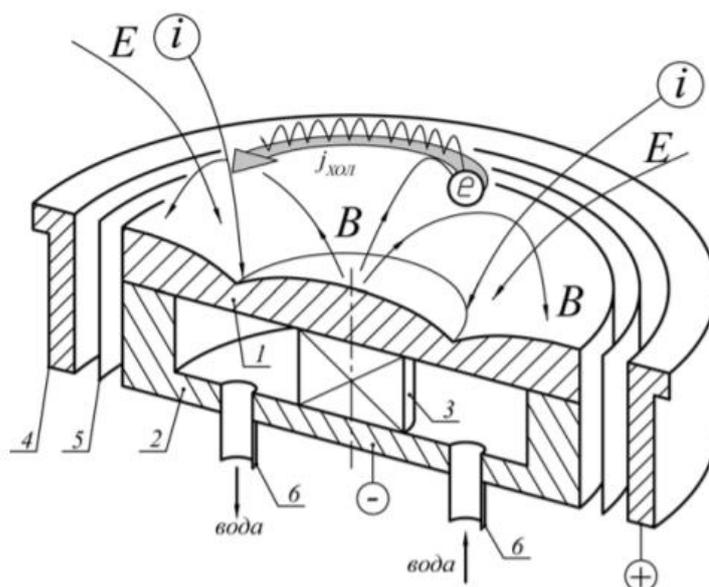


Рисунок 2.4 – Схема устройства магнетронной распылительной системы и движение заряженных частиц в разрядном промежутке: 1 – катод-мишень; 2 – магнитопровод; 3 – магнит; 4 – анод; 5 – электростатический экран; 6 – штуцер подачи воды [42]

Большая часть энергии электрона, прежде чем он попадет на анод, используется на ионизацию и возбуждение, что значительно увеличивает

эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации ионов в плазме и, следовательно, увеличению интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительному росту скорости распыления мишени. Кроме того, чем больше будет расстояние между катодом и анодом, тем больше будет становится ионный ток, так как вероятность столкновений между заряженными частицами с атомами рабочего газа увеличивается. Увеличение ионного тока также способно привести к вторичному выбиванию электронов.

Данный метод обладает рядом преимуществ. К ним относят высокую скорость осаждения пленки, варьируемую в диапазоне от 1 нм/с до десятков нм/с, высокую адгезию напыляемого материала к поверхности подложки и большую вероятность получения однородной по толщине пленки на подложках с большими площадями поверхности [43].

В отличие от других способов нанесения тонкопленочных покрытий, способ магнетронного распыления позволяет достаточно точно регулировать толщину металлического слоя, а значит и его сопротивление, что очень важно при создании структур с определенной проводимостью [44]. Кроме этого, получаемые покрытия обладают низким внутренним напряжением, что является существенным фактором при осаждении покрытия на тонкие полимерные подложки или стеклянные изделия, где требуется сохранить высокое качество оптической поверхности.

Существуют пути повышения эффективности магнетронных распылительных систем. Одним из них является увеличение коэффициента использования мишени. Так как наличие плазмы и ее распространение в магнитном поле вызывает эрозию катода, то на мишени образуется узкая замкнутая канавка, зачастую в центральной части мишени. От размеров канавки, которые определяет магнитное поле, зависит коэффициент использования материала мишени (КИМ). Данный КИМ характеризует часть объема мишени, которая была распылена за некоторый промежуток времени, равный тому времени, за которое глубина канавки будет равна толщине мишени.

Данный метод применялся в исследовании профилей эрозии мишени магнетрона при различном уровне несбалансированности магнитной системы [45]. Исследование показало, что коэффициент использования материала мишени определяется только параметрами магнитной системы магнетрона и является характеристикой для конкретной магнетронной распылительной системы. Кроме того, для увеличения эффективности МРС применяют оптимизацию магнитного поля на поверхности мишени [46]. Как показало исследование использование магнитного шунта, в виде кольца из магнитно-мягкого материала, расположенного между полюсами магнитной системы, приведет к появлению вогнутых линий магнитного поля. Такое действие позволяет увеличить коэффициент использования мишени практически до 80%.

Также был предложен метод оптимизации формы магнитного поля с помощью добавления в систему постоянных магнитов (рис. 2.5). Исследование показало, что линии такой магнитной системы будут также вогнутыми и станут проходить внутри объема распыляемой мишени. Таким образом применяется метод расширения зоны эрозии [47]. То есть устраняется направленное действие магнитного поля на электроны и таким образом, КИМ составил около 45-60%.

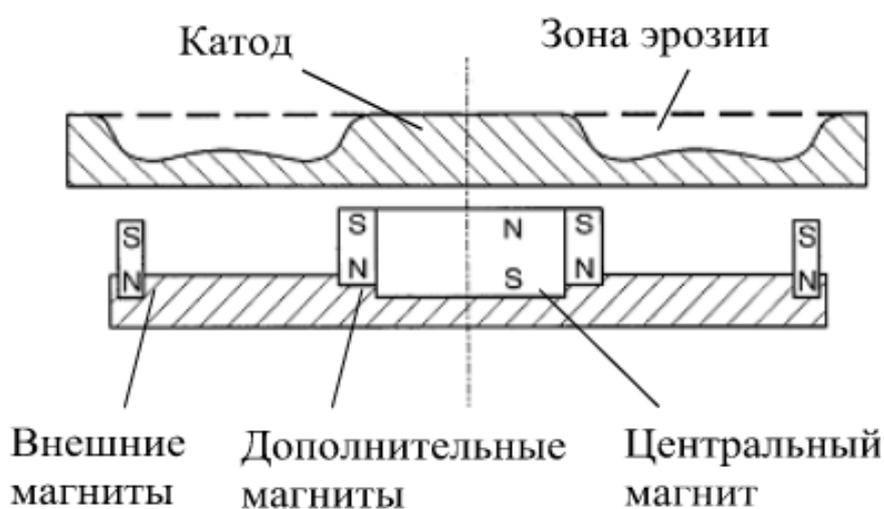


Рисунок 2.5 – Конструкция магнитной системы магнетрона с дополнительными магнитами [48]

Использование дополнительных магнитов, намагниченных параллельно плоскости мишени, позволяет увеличить не только КИМ, но и скорость нанесения пленок, а также снизить рабочее давление внутри МРС. Однако этот метод вызывает новые проблемы, так как наблюдается снижение величины магнитного поля на поверхности мишени.

Кроме того, доказана эффективность применения отдельных источников для магнетронного распыления хрома и никеля для создания тензорезистивных плёнок с наименьшим температурным коэффициентом сопротивления [49].

Магнетронное распыление хрома имеет большую популярность, это доказывает огромное количество работ и исследований, посвященных изучению свойств покрытий хрома и его соединений. Одной из таких работ является исследование влияния смещения подложки на свойства покрытий из нитрида хрома, нанесенных импульсным реактивным магнетронным распылением на постоянном токе [50]. Исследование показало, что ток смещения подложки увеличивался с увеличением частоты смещения и времени обратного смещения. Таким образом, дефекты микроструктуры, низкие адгезионные свойства, недостаточная износостойкость и высокий коэффициент трения, достигается, когда покрытие выращивали при относительно высоком токе смещения подложки.

Исходя из того, что такие металлы, как хром, титан, магний и цинк, обладают высокой скоростью сублимации, эффект увеличения скорости осаждения может проявляться даже тогда, когда мишени из этих металлов находятся в твердом состоянии. Этот метод носит название “распыление горячей мишени” и предполагает, что, нагрев мишени имеет значение температуры ниже точки плавления [51].

В случае распыления горячей мишени, мишень может быть нагрета до повышенных температур за счет энергии бомбардирующих ионов, когда мишень имеет особую теплоизоляцию от корпуса магнетрона с водяным

охлаждением. Таким образом, материал мишени дополнительно сублимирует в дополнение к распылению. Сочетание этих процессов эрозии приводит к увеличению скорости осаждения в 2-10 раз, в зависимости от свойств материала и температуры мишени. Так, например, исходя из результатов проведенных исследований, выяснилось, что как температура, так и физическое состояние мишеней в системах магнетронного распыления существенно влияют на скорость осаждения покрытий и пленок из различных материалов [52]. Таким образом, за счет испарения или сублимации материалов из мишени скорость осаждения может быть увеличена на порядок и даже выше.

В результате было установлено, что горячая мишень приводит к десятикратному увеличению потока энергии к подложке по сравнению с магнетронным распылением с охлажденной мишенью [53]. Интенсивная сублимация из мишени позволила увеличить скорость осаждения пленок хрома примерно на порядок. Более того, плёнки хрома толщиной около 10 мкм, полученные с использованием горячей мишени, имели меньшую шероховатость поверхности и меньшую твёрдость по сравнению с распыленным хромом из охлажденной мишени.

В настоящее время имеются результаты исследований, свидетельствующие о том, что увеличение скорости осаждения металлических покрытий на один или даже два порядка происходит при использовании магнетронов с жидкофазными мишенями, когда их поверхность интенсивно испаряется [54-56]. К сожалению, в работе этих магнетронов существуют некоторые технологические ограничения. Например, мишень должна быть помещена в тигель и находиться в рабочей камере в горизонтальном положении.

Однако для получения покрытий из некоторых металлов (например, Cr, Ti, Mg), обладающих высокой скоростью сублимации, можно работать без тигля. Тогда процесс осаждения может быть более удобным и гибким, как в случае с хромом.

Благодаря сублимации мишени, в дополнение к распылению, скорость осаждения покрытий хрома может быть увеличена примерно в 10 раз по сравнению с распылением охлажденной мишени на расстоянии до подложки 0,08 м. Однако, главным недостатком применения сублимирующей мишени является ухудшение свойств осаждаемого на подложку покрытия. По этой причине, совместно с технологией «горячей» мишени применяют дополнительные источники питания, позволяющие увеличивать энергию и количество ионизированных частиц над поверхностью катода.

В качестве дополнительного источника обычно служат источники высокочастотной индуктивно связанной плазмы или емкостной связанной плазмы [57]. Главным отличием между этими видами источников плазмы является плотность создаваемой ими плазмы. Так, для ёмкостной связанной плазмы плотность плазмы, то есть концентрация образующихся ионов намного ниже, чем для индуктивно связанной плазмы.

Источник индуктивно связанной плазмы позволяет создать магнитное поле с высокой напряженностью, что даёт возможность удерживать большое количество заряженных частиц в зоне образования плазмы и таким образом увеличивать концентрацию заряженных частиц над поверхностью подложки.

Как известно, использование высокочастотной индуктивной плазмы принимается как метод компенсации по ухудшению качества покрытия. Было доказано, что распыление горячей хромовой мишени с использованием высокочастотного источника питания обеспечивает высокую скорость осаждения [58].

В таблице 2.2 представлены сравнительные характеристики электролитического хромирования с магнетронным распылением хромовых покрытий [59-62]. В результате, магнетронное распыление также позволит регулировать толщину и чистоту хромовых покрытий.

Таблица 2.2 – сравнительные характеристики основных методов получения хромовых покрытий

Параметр/ Метод	Магнетронное распыление	Электролитическое осаждение
Токсичность	–	3 класс опасности (CrO ₃ - канцероген группы «А»)
Толщина, мкм	от 0,001 и выше	от 10 и выше
Скорость осаждения, нм/с	1 – 10	5 – 12
Коррозионная стойкость	высокая	высокая
Твёрдость, ГПа	4 – 9	6 – 8
Коэффициент трения	0,5-0,6 (трибометр гидромеханический Frottement)	0,15 – 0,20 (при комнатной температуре с влажностью 40%, при нагрузке 20-150 Н)

Таким образом, в сравнении с электролитическим хромированием магнетронное распыление при использовании сублимирующей мишени и высокочастотного источника индуктивно связанной плазмы позволит получить хромовое покрытие с оптимальными функциональными свойствами.

3. Экспериментальные методы и оборудование

В данном разделе рассматриваются методы и оборудование, используемые в исследовании.

3.1 Вакуумная ионно-плазменная установка

В работе была использована вакуумная ионно-плазменная установка, разработанная в научно-образовательном центре Б.П. Вейнберга Томского политехнического университета (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Изображение экспериментальной установки для проведения магнетронного распыления хромовой мишени

Эксперимент проводился при использовании среднечастотного источника питания APEL-M (Прикладная электроника, г. Томск, Россия) для магнетронной распылительной системы (MPC) с «горячей» и «холодной» мишенями и высокочастотного (13,56 МГц) генератора COMDEL CX1250

(Comdel, Inc. Глостер, Массачусетс, США) для создания индуктивно-связанной плазмы (рис. 3.2).

При использовании разряда постоянного тока (DC-магнетрон) можно расплавлять различные металлы и их сплавы (ванадий, хром, никель, титан, медь, серебро, нержавеющая сталь, латунь, бронза и др.), а также получать их химические соединения, добавляя в плазмообразующий газ (аргон) соответствующие реактивные газы (кислород, азот и др.).

Рабочий газ Ar подается через распределительное кольцо, опоясывающее магнетрон с «горячей» мишенью. Кольцо позволяет рабочему газу равномерно поступать непосредственно в разрядный промежуток вблизи МРС. Держатель подложки зафиксирован относительно собственной оси, при этом сохраняя вращение по оси столика. Расстояние до держателя подложки при прохождении вблизи МРС составило 10 см. МРС оборудована хромовой мишенью (Cr 99,95%) диаметром 90 мм.

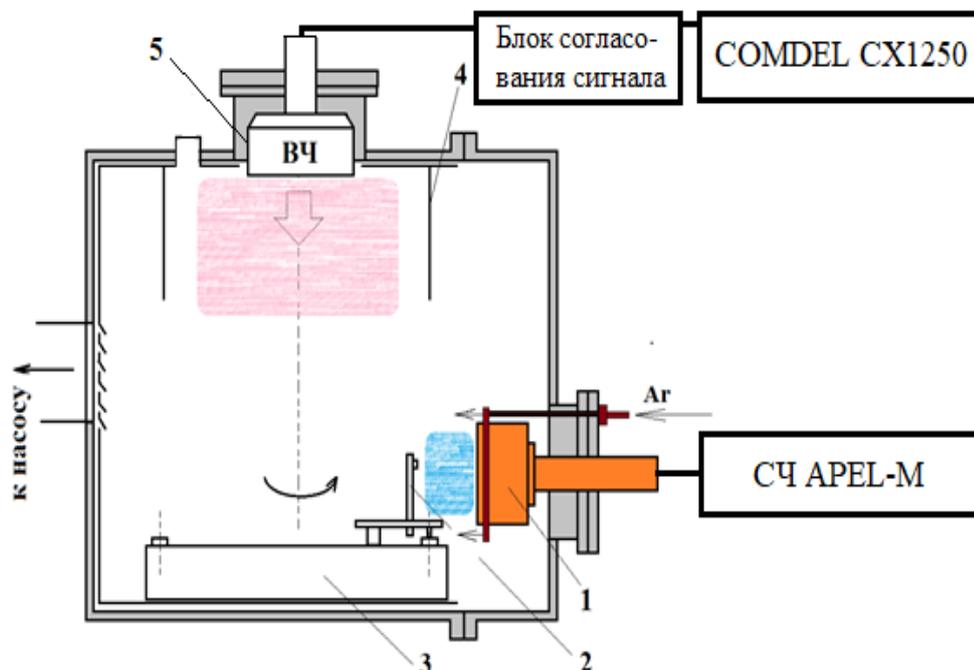


Рисунок 3.2 - Схема эксперимента: 1 – магнетронная система; 2 – держатель подложки; 3 – вращающийся столик; 4 – экран; 5 – ВЧ излучатель

Работа магнетронного распылительного устройства основана на свойствах катодной области аномального тлеющего газового разряда, в которой катод (мишень) распыляется под действием ионной бомбардировки.

Приложенное в области катода перпендикулярно электрическому магнитное поле позволяет снизить рабочее давление плазмообразующего газа без уменьшения интенсивности ионной бомбардировки и улучшить условия транспортировки распыляемого вещества к подложке. Это происходит благодаря уменьшению рассеяния, вызванного соударениями с молекулами газа. Между катодом и подложкой возникает зона низкотемпературной плазмы. Распыляемые частицы осаждаются в виде тонкого слоя, а также частично рассеиваются и осаждаются на стенках рабочей камеры.

Магнетрон имеет возможность работать как с переменным, так и с постоянным током. Кроме того, существует несколько типов магнетронных распылительных систем, в данной работе использованы классический магнетрон с охлаждаемой (холодной) мишенью и магнетрон с сублимирующей (горячей) мишенью.

Конструкция горячей мишени описана в статье, посвященной высокоскоростному магнетронному распылению с горячей мишенью [63]. Магнетрон с сублимирующей (горячей) мишенью применяется в качестве источника сублимирующих атомов материала мишени.

Таким образом в дополнение к процессу ионного распыления используется высокоскоростное осаждение. Для сравнения скоростей осаждения материала на подложку при процессах сублимации и распылении представлена таблица 3.1. Из таблицы видно, что при сублимации материала мишени скорость осаждения атомов, налетающих на подложку, увеличивается почти в 2 раза.

Для нагрева мишени использовалась система магнетронного распыления с косвенным охлаждением. В этой системе использовалась особая геометрия мишени Cr с пустотами (рис. 3.3).

Таблица 3.1 – Характеристики скоростей осаждения материала при магнетронном распылении горячей мишени [64]

Параметр	Значение
$V_{\text{осажд}}$, нм/с	0,48
$V_{\text{осажд}}$, нм/с (сублимация)	0,21
$V_{\text{осажд}}$, нм/с (распыление)	0,27

Примечание: $V_{\text{осажд}}$ – скорость осаждения материала мишени; $N_{\text{субл.част}}$ – количество сублимированных частиц; $N_{\text{расп.част}}$ – количество распыленных частиц.

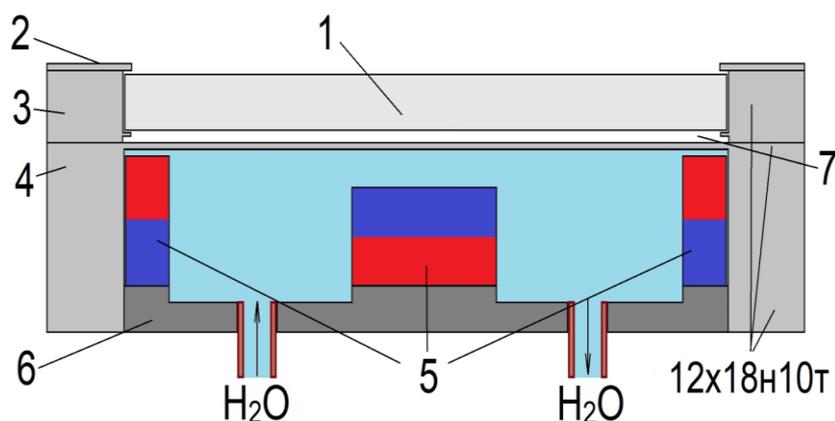


Рисунок 3.3 – Схематичное изображение конструкции горячей мишени: 1 – хромированная мишень; 2 – прижимное кольцо; 3 – посадочное кольцо; 4 – корпус магнетрона; 5 – магнитная система; 6 – магнитопровод; 7 – теплоизолирующий зазор

3.2 Радиочастотный плазменный генератор РПГ-128

Высокочастотная антенна «РПГ-128» является источником индуктивно-связанной плазмы (рис. 3.4). При подключении высокочастотной антенны (1250 Вт) в зоне подложки возникает зона низкотемпературной плазмы.

Данное явление объясняется тем, что высокочастотная антенна имеет плоскую катушку, через которую пропускается ток частотой 13,56 МГц, что приводит к образованию переменного магнитного поля.



Рисунок 3.4 – Радиочастотный генератор плазмы (РПГ-128)

Создание сильного электромагнитного поля способствует осцилляции свободных электронов, которые в свою очередь передают импульс атомам рабочего газа, возбуждая и ионизируя их. Основные технические характеристики РПГ-128 представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики РПГ-128

Параметр	Значение
Частота генератора для возбуждения, МГц	13,56
Максимальная подводимая ВЧ мощность, Вт	1500
Минимальная ВЧ мощность, Вт	300
Диапазон рабочих давлений, Па	0,1-10

3.3 Метод пробоподготовки

Для ионно-плазменной обработки изделий одним из важных параметров считается морфология поверхности, которая может оказывать существенное влияние на адгезию осаждаемых покрытий, их сплошность, равномерность, микроструктуру, величину микронапряжений. Поэтому важно

выполнять пробоподготовку поверхности изделий, используя механические методы. В данной работе использована полировально-шлифовальная машина MP-1B GRINDER POLISHER. Её внешний вид показан на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Полировально-шлифовальная машина MP-1B GRINDER POLISHER

Очистка – это совокупность ряда сложных физических и химических процессов, направленных на удаление органических загрязнений с поверхности изделий. Чаще всего очистка поверхности проводится в моющих средах. Моющие среды должны обладать высокой химической активностью, эффективно разрыхлять, разрушать или растворять плёнки загрязнений, которые представляют собой нежелательное вещество на поверхности очищаемого объекта. Чтобы добиться минимальной шероховатости поверхности стали и исключить влияние морфологии на адгезию осаждаемых покрытий проведена следующая технология пробоподготовки образцов.

1. Механическая шлифовка поверхности изделий с равномерным уменьшением размера зерна (P400, P600, P1200, P2400, P4000, где P – зернистость).
2. Полировка поверхности изделий с использованием шерстяного сукна и алмазной суспензии с размерами абразива 3 и 1 мкм.
3. Очистка и обезжиривание образцов проводились с использованием 3% моющего раствора флаттера и изопропилового спирта.

3.4 Изучение кристаллической структуры.

Дифракция рентгеновских лучей проявляется в виде рассеяния рентгеновских лучей кристаллами (или молекулами жидкостей и газов), при котором из начального пучка лучей возникают вторичные отклонённые пучки той же длины волны, появившиеся в результате взаимодействия первичных рентгеновских лучей с электронами вещества; направление и интенсивность вторичных пучков зависят от строения рассеивающего объекта. Дифракционная картина зависит от длины волны используемых рентгеновских лучей и строения объекта.

Метод позволяет отображать кристаллические структуры, используя более 740 различных настроек типов пространственных групп, преобразовывать различные настройки для моноклинных, орторомбических и ромбоэдрических типов пространственных групп в другие. Таким образом, с помощью данного программного обеспечения был определен состав покрытия и его кристаллическая структура.

Параметры кристаллической решетки для полученных образцов можно получить с помощью рентгеноструктурного анализа. Рентгеноструктурный анализ осуществлялся с помощью установки XRD-7000S Shimadzu (Kyoto, Japan) (рис. 3.6).

Принцип действия данной установки основан на методе исследования структуры вещества по распределению в пространстве рентгеновского излучения и его интенсивностям рассеяния. Взаимодействие рентгеновского излучения с электронами вещества (электронами, находящимися в составе покрытия) создает дифракцию рентгеновских лучей.



Рисунок 3.6 – Рентгеновский дифрактометр XRD-7000S Shimadzu [65]

Основными параметрами съёмки на дифрактометре являются:

- вещество анода и фильтра K_{β} -излучения;
- величина ускоряющего напряжения и ток электронов;
- тип детектора;
- используемая шкала скорости счета импульсов;
- скорость движения детектора;
- шаг сканирования.

В работе использовалась рентгеновская трубка из меди. Излучение K_{α} . Предельно допустимое ускоряющее напряжение составило 40 кВ, электронный ток 30 мА, диапазон сканирования от 10 до 90°, скорость сканирования дифрактометра 10°/мин.

С помощью программного обеспечения PowderCell (Фееральный Институт Исследования и Тестирования Материалов, Берлин) были определены параметры кристаллической структуры полученных хромовых покрытий. Данная программа нацелена для расчета порошковой модели для данных монокристаллов и уточнения экспериментальных кривых.

3.5 Микроструктурный анализ (СЭМ).

Микроструктурный анализ – это распространенный метод изучения наноструктур и наноматериалов. В основных сканирующих электронных микроскопах пучок электронов с энергией, варьирующейся от нескольких сотен эВ до 50 кэВ, фокусируется на поверхности подложки в пятно диаметром около $5 \cdot 10^{-9}$ м, которое сканирует поверхность с помощью системы отклоняющих катушек. Когда эти электроны сталкиваются с поверхностью подложки и проникают в нее, обратно рассеянные электроны проникают в приповерхностные слои и вторичные электроны выбиваются. Эмитированные электроны и фотоны попадают в катодно-лучевую трубку, где и формируются изображения поверхности подложки и ее микроструктуры.

В данной работе использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Hitachi S-3400N (InterLab Inc., Япония) (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Сканирующий электронный микроскоп - Hitachi S-3400N [66]

Данный прибор, оснащенный термоэмиссионным вольфрамовым катодом, позволяет получить изображения покрытий диаметром до 200 мм с высоким разрешением. Микроскоп имеет разрешение в $3 \cdot 10^{-9}$ м при глубоком вакууме и $4 \cdot 10^{-9}$ м при давлении в 270 Па, а также позволяет исследовать подложку с высотой до 80 мм.

3.6 Метод определения коэффициента твёрдости

Для исследования микротвёрдости полученных хромовых покрытий применялся метод измерительного индентирования (метод Виккерса), а именно измерение силы и глубины погружения при вдавливании индентора в материал. Нанотвердомер представляет собой стационарное средство измерений, состоящее из устройства приложения нагрузки и измерительного блока (рис. 3.8). Испытания осуществлялись при использовании нанотвердомера NHT² (Swiss Center for Electronics and Microtechnology, CSM Instruments SA Rue de la Gare 4 CH-2034 Peseux Switzerland). В качестве индентора использовался алмазный сферический индентор.

Принцип действия нано-твердомера основан на статическом вдавливании наконечника - алмазной пирамиды Виккерса, с последующим измерением длин диагоналей восстановленного отпечатка. Пирамида Виккерса имеет квадратное основание, противоположные стороны которого сходятся на вершине под углом 136°. В результате внедрения пирамиды Виккерса на поверхности исследуемого образца остаётся отпечаток в виде ромба. По значению диагонали этого ромба (или среднего арифметического значения обеих диагоналей) устанавливают число твёрдости Виккерса, которое имеет размерность механического давления.



Рисунок 3.8 – Нанотвердомер марки NHT² [67]

3.7 Метод определения коэффициента износа покрытия

Износостойкость покрытий измеряют с использованием машин трения, которые позволяют вести непрерывную запись коэффициента трения по схеме «шарик – вращающийся диск», а также проводить фрактологическое исследование дорожки износа покрытия и площадки износа шарика (рис. 3.9). Скорость износа и коэффициент трения хромовых покрытий были протестированы с использованием трибометра TNTSAH0000 (CSEM, Швейцария) с керамическим шариком Al_2O_3 , нагрузкой 5 Н, скоростью вращения 10 см/с и общей длиной дорожки 50 м. Исследуемый образец закрепляется на вращающемся диске. Зафиксированный нагревающий элемент позволяет вращающемуся диску нагреваться до температуры $800^{\circ}C$.

Коэффициент трения определяется во время теста путем измерения прогиба эластичного рычага. Износ исследуемого образца определяется путем измерения трека образованного в результате действия неподвижного индентора на вращающийся образец.

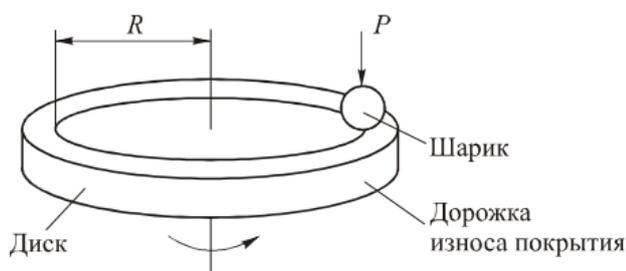


Рисунок 3.9 – Схема испытания износоустойчивости покрытий

Степень износа покрытий определялась по удельному объему дорожки износа материала, который измерялся профилометром и рассчитывался по формуле:

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot S}{F \cdot L} = \frac{\pi \cdot D \cdot S}{F \cdot L} \quad (4)$$

где R – радиус колеи износа; S – площадь поперечного сечения колеи; F – приложенная нагрузка; L – общая длина колеи.

3.8 Метод определения адгезии покрытия

Адгезия покрытий представляет собой сложное явление, определяемое как работа, которую необходимо произвести для разрыва двух поверхностей раздела фаз. Адгезия покрытия зависит от энергии осаждаемых частиц, химических связей между атомами покрытия и подложки, шероховатости и чистоты поверхности, и механической прочности изделия. Выделяют 2 основных процесса, происходящих при осаждении покрытия и напрямую связанных с механизмом адгезии:

- 1) образование химических связей
 - первичные связи: ионные или ковалентные;
 - вторичные связи: водородные и силы Ван-дер-Ваальса.
- 2) механическое связывание.

В основном адгезия между покрытием и подложкой является результатом вторичного механического связывания, поскольку первичное образование химических связей относительно маловероятно, особенно с металлическими подложками. Вторичное механическое сцепление пленки возникает ввиду развитой шероховатости поверхности.

На поверхность покрытия алмазным индентором наносится царапина при постоянной, постепенно нарастающей или пошаговой нагрузке (рис. 3.10). При определенной критической нагрузке L_c (H) покрытие начинает разрушаться.



Рисунок 3.10 – Изображение скретч-тестера [68]

Для исследования адгезионных свойств и износостойкости покрытий в работе использовалось устройство Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000 (рис. 3.11). Устройство предназначено для исследования адгезионных свойств и износостойкости тонких пленок и покрытий.

Данные критической нагрузки фиксируются с высокой точностью с помощью акустического датчика, а также с помощью встроенного оптического микроскопа. Значение критической нагрузки используют для расчета адгезионной силы в системе «покрытие–подложка».

Кроме акустической эмиссии измеряют прилагаемую нормальную нагрузку P , силу трения и глубину проникновения индентора. В совокупности эти параметры определяют уникальный «почерк» каждого покрытия.

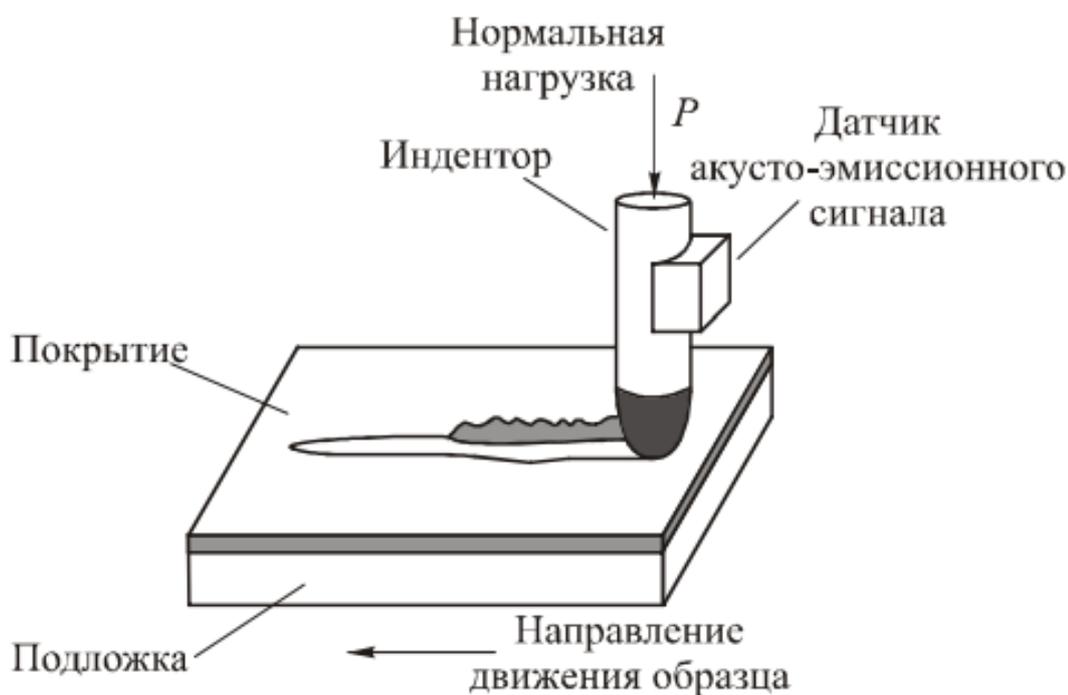


Рисунок 3.11 – Схема контроля адгезионной прочности покрытия методом скретч–тестирования (царапания)

В работе при исследовании адгезионной прочности использовался алмазный индентор с радиусом 100 мкм, нагрузка изменялась равномерно от 0,01 до 30 Н со скоростью 5 Н/с, длина царапины 4 мм.

3.9 Метод определения коррозионной стойкости покрытий.

Как известно хромовые покрытия используют для защиты материалов и изделий от коррозии. Для изучения коррозионной стойкости материала принято использовать метод поляризационной потенциодинамики. В данном эксперименте используется потенциостат-гальваностат Electrochemical Instruments Р45-Х подключенный к электрохимической ячейке, представленной на рисунке 3.12. Этот прибор необходим для изменения величины потенциала с шагом $\sim 0,1$ мВ/с.

Для хромовых покрытий в качестве электролита зачастую применяют растворы, которые имитируют состав морской воды. В нашем случае в роли электролита использовался раствор 3,5 масс % NaCl. В качестве электрода сравнения использовался Ag/AgCl электрод. Противоположным электродом выступал графитовый стержень. Перед проведением основного испытания поверхность испытуемого образца выдерживалась в электролите при потенциале разомкнутой цепи в течение 2000 секунд для компенсации зарядов.

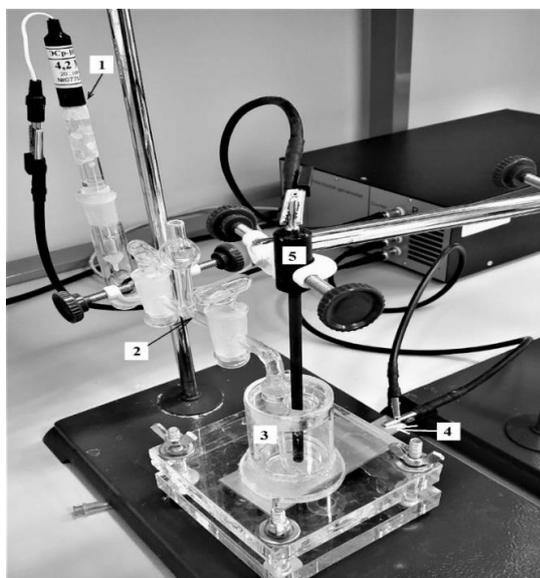


Рисунок 3.12 – Изображение подключенной электрохимической ячейки: 1 – электрод сравнения ЭСр-10101/4,2(«Ref»); 2 – электролитический ключ (мостик); 3 – основной объём ячейки; 4 – токосъёмник рабочего электрода (образца) («Work» + «Comp»); 5 – вспомогательный электрод («Counter»)

Принцип работы коррозионного стенда проходит в несколько этапов. На первом этапе в результате электрохимической реакции между электродом сравнения и исследуемым образцом происходит окисление электрода с высвобождением с электронов с его поверхности. При этом в электролите будет протекать обратный процесс, то есть поглощение свободных электронов (реакция восстановления).

После того, как электрохимические реакции достигнут равновесного состояния определяется значение электрического потенциала свободной коррозии на образце относительно потенциала на электроде сравнения.

На втором этапе при заполнении электрохимической ячейки электролитом и подаче потенциала на исследуемый образец протекает электрохимическая реакция, где электроны с поверхности образца попадают на окислительно-восстановительный электрод.

При изменении величины потенциала регистрируется ток электронов, поступающих на электрод из графита. На данном этапе электрод сравнения применяется для контроля величины потенциала.

Сопротивление поляризации следует рассчитывать, исходя из выражения Штерна-Гири:

$$i_{cor} = \frac{B}{R_p}, \quad (3)$$

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c)}, \quad (2)$$

Здесь, B – коэффициент Штерна-Гири; β_a – Тафелевский наклон анодной кривой; β_c – Тафелевский наклон катодной кривой. i_{cor} – ток коррозии по пересечению Тафелевских прямых; R_p – сопротивление поляризации.

Таким образом:

$$|R_p| = \left| \frac{B}{i_{cor}} \right|, \quad (3)$$

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Разработка научного исследования (НИ) производится группой работников, состоящей из двух человек – научного руководителя и студента.

Настоящая выпускная квалификационная работа заключается в изучении влияния типа мишени и ассистирования высокочастотной индуктивно-связанной плазмой на функциональные характеристики хромовых покрытий при магнетронном распылении сублимирующей мишени.

Основная цель данного раздела – определить перспективность и успешность технологии, оценить её эффективность, уровень возможных рисков, разработать механизм управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел включает в себя рассмотрение следующих задач:

1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности технологии.
2. Планирование этапов выполнения исследования.
3. Выполнение расчета бюджета научно-исследовательской работы.
4. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения

5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Настоящая выпускная квалификационная работа посвящена изучению влияния типа мишени и ассистирования высокочастотной индуктивно-связанной плазмой при магнетронном распылении на получение функциональных хромовых покрытий, которые широко применяются в качестве защитных покрытий.

Продуктом исследования является модифицированное стальное изделие, на поверхность которого было нанесено хромовое покрытие при магнетронном распылении сублимирующей мишени и применении ионного ассистирования.

Исходя из области применения данных покрытий можно судить о круге лиц, которые будут потенциально заинтересованы данной технологией. Целевым рынком являются области машиностроения, атомной и энергетической промышленности, потому что зачастую именно в данных отраслях требуются изделия с высокими функциональными свойствами.

Потребителями данного исследования являются промышленные предприятия, компании, специализирующиеся на предоставлении инженерно-технических услуг и научные центры и лаборатории. Промышленные предприятия заинтересованы получить новую технологию получения хромовых покрытий, которая позволяет увеличить срок службы изделий и их защитные свойства для работы в различных средах и условиях.

Например, для создания тепловыделяющих элементов в атомных реакторах требуется применение высококачественных хромовых покрытий на циркониевых оболочках. Для остальных потребителей интерес заключается в научной новизне, потому что данная технология может быть использована как фундамент для проведения исследовательских работ.

5.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных решений целесообразно проводить при помощи оценочной карты, для этого определим 2-х конкурентов на рынке: технология осаждения хромовых покрытий с помощью метода электролитического хромирования (B_1), магнетронное распыление хромовых покрытий (B_2).

Технология осаждения хромовых покрытий с помощью электролитического хромирования отличается высокой скоростью осаждения, простотой и высокой коррозионной стойкостью покрытия.

Однако применение агрессивных кислот в качестве электролита оказывает пагубное влияние на окружающую среду и требует строгого соблюдения правил безопасности.

Технология магнетронного распыления хромовых покрытий позволяет получать покрытия, которые превосходят по микроструктуре, плотности и твёрдости покрытия, которые получают с помощью электрохимического хромирования.

Технология магнетронного распыления хромовых покрытий имеет в сравнении с нашей технологией главным недостатком – низкими скоростями осаждения покрытия. Именно поэтому мы разрабатываем технологию высокоскоростного осаждения хромовых покрытий, которые обладали бы оптимальными функциональными свойствами.

Расчет показателей конкурентоспособности проводился по следующей формуле

$$K = \sum_i B_i \cdot V_i \quad (5.1)$$

где B_i – балл i -го показателя;

V_i – вес показателя.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок).

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	$B_{\kappa 1}$	$B_{\kappa 2}$	K_{ϕ}	$K_{\kappa 1}$	$K_{\kappa 2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Производительность	0,25	5	4	4	1,25	1	1
2. Надежность	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
3. Простота методики	0,1	3	5	4	0,3	0,5	0,4
4. Адгезионная прочность покрытий	0,25	5	2	4	1,25	0,5	1
5. Возможность автоматизации	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
Экономические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,05	5	3	4	0,25	0,15	0,2
2. Стоимость технологии	0,06	4	4	5	0,24	0,24	0,3
3. Уровень проникновения на рынок	0,04	4	3	3	0,16	0,12	0,12
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	2	3	0,25	0,1	0,15
Итого	1	41	33	33	4,7	3,41	4,07

Согласно вышеприведенному расчету видно, что предлагаемая технология высокоскоростного осаждения хромовых покрытий имеет более высокий показатель конкурентоспособности (4,7).

Это обусловлено следующим рядом факторов: технология имеет высокую производительность, надёжность, высокие функциональные свойства хромовых покрытий, конкурентноспособность и большой предполагаемый срок эксплуатации.

5.1.3 SWOT – анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Результаты исследования приведены в SWOT-анализ (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – SWOT-анализ.

	<p>Сильные стороны проекта</p> <p>С1. Высокая производительность технологии.</p> <p>С2. Востребованность в промышленности, как эффективный метод напыления защитного покрытия.</p> <p>С2. Высокая повторяемость технологии.</p>	<p>Слабые стороны проекта</p> <p>Сл1. При проведении экспериментов могут возникнуть проблемы с контролем напыления покрытий.</p> <p>Сл2. Отсутствие финансирования проекта.</p> <p>Сл3. Высокая стоимость комплектующих установки.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной структуры ТПУ.</p>	<p>1.Получение результатов технологии</p> <p>2.Продвижение НТИ на рынок</p>	<p>1. Повышение квалификации кадров у потенциальных потребителей</p> <p>2. Поиск дополнительного финансирования в виде грантов</p>

В2. Повышение стоимости конкурентных разработок.		3. Приобретение необходимого оборудования
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на НТИ;</p> <p>У2. Уменьшение финансирования исследования</p> <p>У3. Введение дополнительных государственных требований к сертификации.</p>	<p>1. Продвижение технологии с целью создания спроса</p> <p>2. Сертификация и стандартизация технологии</p>	<p>1. Приобретение необходимого оборудования/использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>2. Поиск дополнительного финансирования, в виде грантов и премий.</p> <p>3. Продвижение НТИ с целью создания спроса</p>

Вывод по SWOT-анализу: в ходе анализа были рассмотрены сильные и слабые стороны научного исследования, а также возможные его последствия. Как позитивные, так и негативные – возможности и угрозы. SWOT-анализ показал, что данная технология может привести как к положительному исходу: у данной технологии появится спрос у сторонних предприятий и исследователей, что послужит увеличению финансирования и продвижению на рынок.

Также может произойти и отрицательный исход, а именно: данная технология не найдет должного финансирования или будет слишком долго продвигаться.

5.2 Планирование научно-исследовательских работ

5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления. Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ.

Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы приведён в таблице 5.3. Работа выполнялась студентом (инженер) под руководством научного руководителя.

Таблица 5.3 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№	Содержание работ	Должность
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
	2	Календарное планирование работ	Научный руководитель
Теоретические исследования	3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
Экспериментальные исследования	4	Составление плана экспериментов	Научный руководитель, инженер
	5	Подготовка образцов для экспериментальных работ	Инженер

	6	Проведение эксперимента	Научный руководитель, инженер
	7	Выполнение расчётов	Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Анализ и обработка полученных результатов	Инженер
	9	Обсуждение и оценка эффективности результатов	Научный руководитель, инженер
Оформление отчёта по НИР	10	Составление пояснительной записки	Инженер
	11	Подготовка к защите работы	Инженер

5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностных характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{minі} + 2t_{maxі}}{5} \quad (5.2)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{minі}$ - минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{maxі}$ - максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.

Среднее значение трудоемкости составляет:

$$t_{ожі} = \frac{3 \cdot 7 + 2 \cdot 30}{5} = 16,2 \text{ чел. -дн.} \quad (5.3)$$

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65%.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} \quad (5.4)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Продолжительность одной работы составляет:

$$T_{pi} = \frac{16,2}{2} = 8,1 \text{ раб. дн.} \quad (5.5)$$

5.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни.

Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} \quad (5.6)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -ой работы в календарных днях;
 T_{pi} – продолжительность выполнения i -ой работы в рабочих днях; $k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \quad (5.7)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Коэффициент календарности составляет:

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22 \quad (5.8)$$

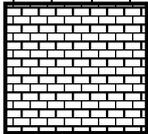
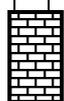
Продолжительность выполнения i -ой работы:

$$T_{ki} = 8,1 \cdot 1,22 = 9,882 = 10 \text{ кал. дн.} \quad (5.9)$$

Календарный план-график проведения представлен в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Распределение исполнителей и этапы работ.

№	Вид работ	Исполнитель	Т _к , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ						
				Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май		
1	Составление ТЗ	Научный руководитель	4							
2	Календарное планирование	Научный руководитель	4							

3	Изучение литературы	Инженер	14																	
4	Составление плана экспериментов	Научный руководитель	9																	
		Инженер	9																	
5	Подготовка образцов и осаждение покрытий	Научный руководитель	14																	
		Инженер	14																	
6	Проведение испытаний образцов	Инженер	24																	
7	Анализ полученных результатов	Научный руководитель	10																	
		Инженер	14																	
8	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель	10																	
		Инженер	10																	
9	Составление пояснительной записки	Инженер	14																	

5.3.1 Расчет материальных затрат НИИ

В данную статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi} \quad (5.10)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы (15-25% от стоимости материалов).

Значения цен на материальные ресурсы были установлены по действующим прейскурантам или договорным ценам. В таблице 5.5 приведены расходы по данной статье.

Таблица 5.5 – Сырье, материалы, комплектующие изделия.

Наименование	Марка, размер, мм	Кол-во	Цена на ед., руб.	Затраты на материалы (Z _м), руб.
Мишень из хрома	90x6	1	30 000	36 000
Баллон аргона	Ar, 99,9%	1	8 000	9 600
Подложки их стали	40x13	4	20	96
Подложки из кремния	-	4	40	192
Итого				45 888

5.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры и т.п.), необходимого для проведения работ. Однако, при выполнении данного исследования дополнительное оборудование для проведения исследований не было приобретено.

Все использованное оборудование являлось собственностью отделения экспериментальной физики НИИ ТПУ. Поэтому необходимо рассчитать амортизационные отчисления для использованного оборудования. Расчет амортизации производился следующим образом:

$$H_a = \frac{1}{n} \quad (5.11)$$

где n – срок полезного использования (СПИ) в количестве лет.

Ежемесячные амортизационные отчисления:

$$A_M = \frac{H_a \cdot И}{12} \quad (5.12)$$

где $И$ – первоначальная стоимость оборудования (ПСО), тыс. руб.

Расчет амортизационных отчислений приведен в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Амортизационные отчисления.

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	СПИ	ПСО, тыс. руб	Норма амортизации	Ежемесячные отчисления, тыс. руб
1	Вакуумная установка	1	10	8 000	0,10	66,7
2	Генератор плазмы РПГ-128	1	10	1 000	0,10	8,3
3	Сканирующий электронный микроскоп	1	10	2 000	0,10	16,7

4	Дифрактометр	1	20	1 000	0,05	4,2
5	Ноутбук	1	5	50	0,2	1
6	Трибометр	1	20	1 000	0,05	4,2
7	Твердомер КВ-10	1	20	2 000	0,05	8,8
Итого по статье						109,9

Таким образом, амортизационные затраты на специальное оборудование в ходе научного исследования в сумме на специальное оборудование составили 109,9 тыс. рублей.

5.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме и дополнительная заработная плата персонала. Баланс рабочего времени представлен в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Баланс рабочего времени.

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	265
Календарное число нерабочих дней		
- выходные дни	52	82
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	45	52
- невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	254	217

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (5.13)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20% от $Z_{осн}$).

Основная заработная плата $Z_{осн}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб} \quad (5.14)$$

где $T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} \quad (5.15)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 24 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя);

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{ТС} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p \quad (5.16)$$

где $Z_{ТС}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3;

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3

Расчет основной заработной платы представлен в таблице 5.8

Руководителем в данном случае выступает Сиделёв Д.В. доцент, к.т.н, оклад которого составляет 37700 р., оклад инженера примем равным 13900 р. Премии коэффициент и коэффициент доплат учитывать не будем.

Таблица 5.8 – Расчет основной заработной платы.

Исполнители	$Z_{мс}$	$k_{пр}$	$k_{д}$	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.	$Z_{доп}$, руб.	$Z_{зп}$, руб.
Руководитель	37700	-	-	1,3	49010	2007	51	102 357	15 353,5	117 710,55
Инженер	13900	-	-	1,3	18070	866	113	97 858	14 678,7	112 536,7
Итого по статье								200 215	30 032,25	230 247,25

5.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (5.17)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12-0,15).

Результаты расчета представлены в таблице 5.8.

5.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам

государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (5.18)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Отчисления на социальные нужды (30% от статьи заработной платы) составили 60025 руб.

5.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии и т.д.

Их величина определяется по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot (\text{сумма статей 1: 7}) \quad (5.19)$$

$k_{\text{накл}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов возьмём в размере 16%.

$$\begin{aligned} Z_{\text{накл}} &= 0,16 \cdot (45888 + 109900 + 200215 + 21437,6 + 60025) \\ &= 69\,994,5 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (5.20)$$

5.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект представлен в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Расчет бюджета затрат НИИ.

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты	45 888
Амортизационные отчисления	109 900
Затраты на основную заработную плату	178 647
Затраты на дополнительную заработную плату	21 437,6
Страховые отчисления	60 025
Накладные расходы	69 994,5
Бюджет затрат НИИ	485 892,1

5.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Эффективность научного ресурсосберегающего проекта включает в себя социальную эффективность, экономическую и бюджетную эффективность. Показатели общественной эффективности учитывают социально-экономические последствия осуществления инвестиционного проекта как для общества в целом, в том числе непосредственные результаты и затраты проекта, так и затраты, и результаты в смежных секторах экономики, экологические, социальные и иные внеэкономические эффекты.

Показатели экономической эффективности проекта учитывают финансовые последствия его осуществления для предприятия, реализующего данный проект. В этом случае показатели эффективности проекта в целом характеризуют с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проектные решения. Бюджетная эффективность характеризуется участием государства в проекте с точки зрения расходов и доходов бюджетов всех уровней. Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (5.21)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп}}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайшие аналоги процесса высокоскоростного осаждения хромовых покрытий ($\Phi_{p1}=468126$), технология осаждения хромовых покрытий с помощью электролитического хромирования ($\Phi_{p2}=340500$), магнетронное распыление хромовых покрытий ($\Phi_{p3}=492000$).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}1} = \frac{482\,441,2}{482\,441,2} = 1 \quad (5.22)$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}2} = \frac{340500}{482\,441,2} = 0,71 \quad (5.23)$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}3} = \frac{492\,000}{482\,441,2} = 1,02 \quad (5.24)$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разы.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (5.25)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки; a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки; b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания; n – число параметров сравнения.

Далее в таблице 5.10 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта, где аналог 1 – технология осаждения хромовых покрытий с помощью электролитического хромирования, аналог 2 – магнетронное распыление хромовых покрытий.

Таблица 5.10 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта.

Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
Критерии				
1.Адгезионная прочность покрытий	0,25	5	2	3
2.Экологичность	0,25	5	2	5
3.Надежность	0,2	5	3	4
4.Безопасность	0,2	5	2	5
5.Простота эксплуатации	0,1	3	5	4
Итог	1	23	14	21

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,25 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,1 \cdot 3 = 4,8 \quad (5.26)$$

$$I_{p2} = 0,25 \cdot 2 + 0,25 \cdot 2 + 0,2 \cdot 3 + 0,2 \cdot 2 + 0,1 \cdot 5 = 2,5 \quad (5.27)$$

$$I_{p3} = 0,25 \cdot 3 + 0,25 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 = 4,2 \quad (5.28)$$

Интегральный показатель эффективности разработки ($I_{\text{фин}}^p$) и аналога ($I_{\text{фин}}^a$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{фин}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p} = \frac{4,8}{1} = 4,8 \quad (5.29)$$

$$I_{\text{фин}}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_{\phi}^p} = \frac{2,5}{0,71} = 3,52 \quad (5.30)$$

$$I_{\text{фин}}^{a2} = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p} = \frac{4,2}{1,02} = 4,12 \quad (5.31)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{фин}}^p}{I_{\text{фин}}^{ai}} \quad (5.32)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ – сравнительная эффективность проекта;

$I_{\text{фин}}^p$ – интегральный показатель разработки;

$I_{\text{фин}}^{ai}$ – интегральный технико-экономический показатель аналога.

В таблице 5.11 представлена сравнительная эффективность разработки, аналог 1 – технология осаждения хромовых покрытий с помощью метода электролитического хромирования, аналог 2 – магнетронное распыление хромовых покрытий.

Таблица 5.11 – Сравнительная эффективность разработки.

№	Показатели	Разра- ботка	Аналог 1	Ана- лог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,71	1,02
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,8	2,5	4,2
3	Интегральный показатель эффективности	4,8	3,52	4,12
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,7	1,01

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения, поставленного в данной технической задаче с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

1. В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент» был выполнен анализ конкурентоспособности. Данный анализ подтвердил конкурентоспособность применения технологии высокоскоростного осаждения хромовых покрытий, в связи с более высокими показателями функциональных характеристик поверхности изделий.

2. Проведен SWOT-анализ проекта, в ходе которого были выявлены потенциальные внутренние и внешние сильные и слабые стороны, возможности и угрозы. Анализ показал, что потенциальных сильных сторон у проекта больше, чем слабых, что доказывает перспективность разработок проекта.

3. Установлено, что в календарных днях длительность работ для научного руководителя составило 51 дней, а для инженера 113 дней. На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был составлен календарный план-график, исходя из которого видно, что самые продолжительные по времени работы – подготовка образцов, осаждение покрытий и проведение испытаний образцов.

4. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 485 892,1 руб.;

5. Определены показатели ресурсоэффективности, интегральный финансовый показатель, интегральный показатель эффективности и сравнительная эффективность вариантов исполнения, значения которых свидетельствуют о высокой эффективности реализации технического проекта.

6. Социальная ответственность

Введение

Данный раздел посвящен рассмотрению таких вопросов, как обеспечение нормативных условий труда, в которые входят санитарно-гигиенические условия, пожарная безопасность, а также лечебно-профилактические меры и другие мероприятия [75]. Важным условием является согласование данных действий с нормативными документами, действующими на территории Российской Федерации. Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Согласно [76] к выполнению работы на вакуумных установках допускаются работники не моложе 18 лет, прошедшие медицинский осмотр и не имеющие противопоказания по состоянию здоровья, имеющие необходимую теоретическую и практическую подготовку, получившие необходимые практические навыки по выполнению работ на вакуум-формовочной машине и прошедшие вводный и первичный инструктажи по охране труда на рабочем месте. При введении в эксплуатацию нового оборудования сотрудники должны пройти внеплановый инструктаж по правилам эксплуатации и безопасной работе на данном оборудовании. Сотрудник, независимо от квалификации и стажа работы, не реже одного раза в три месяца должен проходить повторный инструктаж по охране труда; в случае нарушения требований безопасности труда, при перерыве в работе более чем на 30 календарных дней, он должен пройти внеплановый инструктаж. Для самостоятельной работы на вакуум-формовочной машине сотрудник должен пройти стажировку под руководством более опытного коллеги для приобретения практических навыков работы на станке.

Сотрудник, показавший неудовлетворительные навыки и знания правил безопасности к самостоятельной работе с оборудованием, не допускается.

Настоящая выпускная квалификационная работа посвящена роли ионного ассистирования на свойства металлических покрытий. В данной работе эксперименты производились на вакуумной ионно-плазменной установке, состоящей из форвакуумной и высоковакуумной линии откачки, блоков питания высокого напряжения, газового баллона с сжатым аргоном. Научно-технической базой для проведения исследования стала лаборатория 101 научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга.

6.1 Организация рабочей зоны исследователя

Организация рабочей зоны исследователя должна обеспечиваться в полном соответствии с существующими нормами техники производственной безопасности, нормами санитарии и требованиями по охране окружающей среды [77,78]. Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации.

Требуемые материалы для выполнения работ, следует располагать в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1. Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне **а** (в центре);
- клавиатура – в зонах **г** и **д**;
- системный блок размещается в зоне **б** (слева);
- принтер находится в зоне **а** (справа);
- документация – в зоне легкой досягаемости ладони;
- в зоне **в** (слева) размещается литература и документация, необходимая при работе;

– в выдвижных ящиках стола размещается литература, которая не используется постоянно.

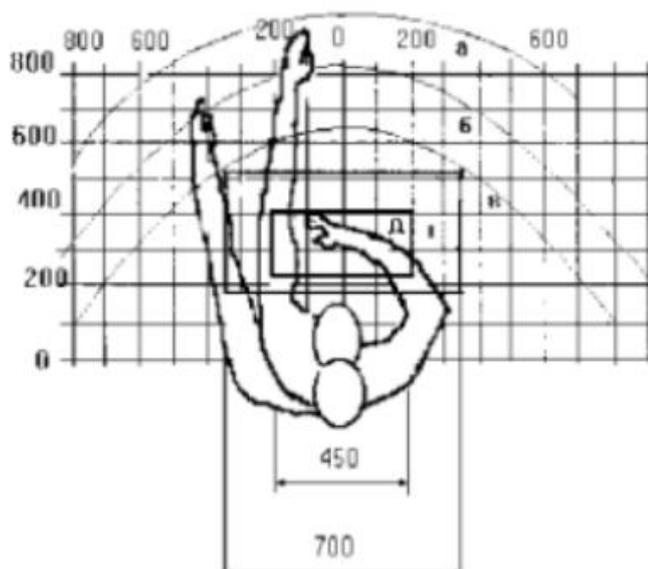


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке – зона легкой досягаемости ладони; в – оптимальное пространство для грубой ручной работы; г – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Для проектирования письменного стола должны быть учтены следующие требования:

– высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм;

– высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм;

– рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм;

– пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно–поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов.

Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране [79]. Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

6.2 Анализ вредных производственных факторов

Работа на ионно-плазменной вакуумной установке оказывает некоторые вредные и опасные факторы [80], которые негативно влияют на здоровье сотрудника лаборатории.

Перечень возможных вредных и опасных факторов, характерных для работы с экспериментальной установкой и соответствующие нормативные документы представлены в таблице 6.1.

К первой группе факторов можно отнести отсутствие естественного света, повышенный уровень шума, а также отклонение показателей микроклимата. Ко второй группе факторов: химическое воздействие на организм и электрический ток.

Таблица 6.1 – Возможные опасные и вредные факторы при работе с экспериментальной ионно-плазменной установкой

Факторы		Нормативные документы
Вредные	Опасные	
Повышенный уровень шума		ГОСТ 12.1.029-80 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация» [81]
Отсутствие естественного света		СанПин 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение» [82]
	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность» [83]
Отклонение показателей микроклимата		СанПин 2.2.4.548-96. «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [84]
	Химическое воздействие на организм	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ. Пожарная безопасность [85]

6.2.1 Анализ вредных факторов

1. Повышенный уровень шума

Основными источниками шума при работе на ионно-плазменной установке являются вытяжка, форвакуумный спиральный и высоковакуумные турбомолекулярный и криогенный насосы.

Вытяжка включается при работе с сильными кислотами и спиртами. Шум и вибрация на производстве являются одними из ключевых факторов, влияющих на здоровье человека и его условия труда.

Повышенный уровень шума может не только ослаблять реакцию, внимание и ухудшать память, но и оказывать неблагоприятное воздействие на центральную нервную систему, слух и приводить к таким нарушениям здоровья как глухота и тугоухость.

Форвакуумный спиральный насос работает во время создания и поддержания вакуума в камере, шум от которого не более 58 дБ [86], что соответствует допустимому уровню шума в лабораториях для проведения научных экспериментов, который не должен превышать 75 дБ [81]. Шум от турбомолекулярного и криогенного насосов также не превышает 50 дБ. Поэтому существенного влияния на изменения уровня шума форвакуумные и высоковакуумные насосы не оказывают.

В качестве коллективной защиты рекомендуется использовать такие средства как: акустические экраны, перегородки, объемные поглотители звука. Помимо этого, в качестве средств индивидуальной защиты следует использовать специальные противошумные наушники, вкладыши в ушную раковину, противошумные каски.

В таблице 6.2 представлены предельно допустимые уровни звукового давления для лаборатории с шумным оборудованием.

Таблица 6.2 – Предельно допустимые уровни звукового давления для лаборатории с шумным оборудованием [87]

Частота, Гц								
Уровень звукового давления, дБ								
31	65	125	250	500	1000	2000	4000	8000
103	91	83	77	73	70	68	66	64

В результате уровень шумового воздействия в лаборатории 101 НОЦ Б.П. Вейнберга не превышает установленных норм [87].

2. Освещение

Согласно [82] в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении освещенность при системе общего освещения должна составлять не менее 200 Лк.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда. На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда. Для защиты от слепящей яркости видимого излучения (факел плазмы в камере) применяют защитные очки, щитки, шлемы. Очки на должны ограничивать поле зрения, должны быть легкими, не раздражать кожу, хорошо прилегать к лицу и не покрываться влагой.

При анализе структурных и функциональных свойств материалов использовался персональный компьютер. Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 – 500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана должна быть не более 300 лк.

а. Расчет искусственного освещения

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Производственное помещение, где располагается экспериментальная ионно-плазменная установка, имеет следующие параметры (таблица 6.3).

Таблица 6.3 – Параметры помещения

Длина (<i>A</i>), м	Ширина (<i>B</i>), м	Высота (<i>H</i>), м	Высота рабочей поверхности над полом (<i>h_{pn}</i>), м
14,5	9,5	3,7	0,8

Рассчитаем площадь помещения *S*:

$$S = A \cdot B = 14,5 \cdot 9,5 = 137,75 \text{ м}^2. \quad (6.1)$$

Выбираем светильник ALS.OPL 418 HF ES1 [88], световой поток которой равен $\Phi_{\text{лд}} = 1350$ Лм. Светильник имеет 4 лампы мощностью 18 Вт, длина светильника равна 640 мм, ширина – 640 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем $\lambda=1,1$, расстояние светильников от перекрытия $h_c = 0,3$ м.

Определяем расчетную высоту светильника над рабочей поверхностью по формуле:

$$h = H - h_c - h_{\text{pn}} = 3,7 - 0,3 - 0,8 = 2,6 \text{ м}. \quad (6.2)$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами светильников *L* рассчитываем по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,6 = 2,86 \text{ м}. \quad (6.3)$$

Расстояние от крайнего ряда светильников до стены:

$$L = L/3 = 0,953 \text{ м}. \quad (6.4)$$

Определяем индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{14,5 \cdot 9,5}{2,6 \cdot (14,5 + 9,5)} = 2. \quad (6.5)$$

Зная коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор $\rho_c=50\%$, свежепобеленного потолка $\rho_{\text{п}}=70\%$ и пола – 20 %, коэффициент использования светильника равен 0,51. Коэффициент запаса,

учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли K_3 равен = 1,5. Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп $Z = 1,1$. Тогда количество светильников, необходимых для установки в лаборатории 101 НОЦ им. Вейнберга равно:

$$N = \frac{E \cdot S \cdot K_3}{\eta \cdot n \cdot \Phi_{л}} = \frac{200 \cdot 138 \cdot 1,5}{0,51 \cdot 4 \cdot 1350} = 15,032 = 16. \quad (6.6)$$

где E – требуемая горизонтальная освещенность, Лк; S – площадь помещения, м; K_3 – коэффициент запаса; U – коэффициент использования; $\Phi_{лд}$ – световой поток одной лампы, лм; η – коэффициент использования светильника.

Световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 14,5 \cdot 9,5 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{16 \cdot 4 \cdot 0,51} = 1393 \text{ лм}. \quad (6.7)$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{лд} - \Phi}{\Phi_{лд}} \leq 20\% = -10\% \leq \frac{1350 - 1393}{1350} \leq 20\%. \quad (6.8)$$

Таким образом: $-10\% \leq -3,19\% \leq 20\%$, необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона. Размещаем светильники в 2 ряда по 8 штук. На рисунке 6.2 изображен план размещения светильников с люминесцентными лампами в лаборатории 101 НОЦ Б.П. Вейнберга.

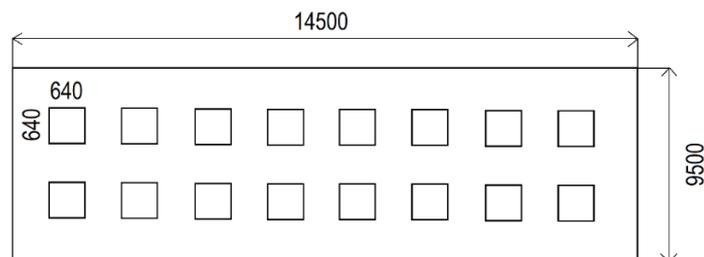


Рисунок 6.2 – План размещения светильников в лаборатории 101 НОЦ Б.П. Вейнберга

Фактическое освещение в лаборатории 101 НОЦ Б.П. Вейнберга соответствует расчетным показателям и соответствует нормам [82].

3. Отклонение показателей микроклимата

Микроклиматом производственных помещений называют метеорологические условия внутри помещений. Эти условия определяются действующим на организм человека рядом факторов. В этот ряд входят температура воздуха, влажность, скорость движения воздуха и тепловое излучение.

Также на микроклимат влияет набор физических факторов, оказывающих влияние на состояние человека. Это теплообмен человека с окружающей средой и факторы, определяющие самочувствие. При наступлении переохлаждения снижается температура тела, происходит сужение кровеносных сосудов, возникают сбои в работе сердечно-сосудистой системы человека.

Оптимальные микроклиматические условия установлены по критериям оптимального теплового и функционального состояния человека. Они обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8- часовой рабочей смены при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах [91].

Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений представлены в таблице 6.4. Выполняемые работы относятся к I₆ категории работ. К данной категории относятся работы с интенсивностью энергозатрат 121–150 ккал/ч (140–174 Вт), производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением.

Таблица 6.4 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений [91]

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22-24	21-25	40-60	0,1
Теплый	23-25	22-26	40-60	0,1

Температура наружных поверхностей технологического оборудования, ограждающих устройств, с которыми соприкасается в процессе труда человек, не превышает 45 °С. Для создания оптимальных метеорологических условий применяется кондиционер, который поддерживает оптимальные параметры микроклимата автоматически, независимо от меняющихся условий. В холодное время года для поддержания в помещении оптимальной температуры воздуха применяется отопление. Рассчитаем объем помещения

$$V = S \cdot H = 137,75 \cdot 3,7 = 509,68 \text{ м}^3. \quad (6.9)$$

Кратность воздухообмена для производственных помещений согласно [85], определяется как

$$K_v = \frac{L_{\text{возд}}}{V_{\text{помещ}}} \quad (6.10)$$

где $L_{\text{возд}}$ – расчётный воздухообмен помещения, м³/ч;

$V_{\text{помещ}}$ – объем помещения, м³.

Расчётный воздухообмен помещения вычисляют по формуле:

$$L = L_0 \cdot N \quad (6.11)$$

где L_0 — нормативный воздухообмен на 1 человека, м³/(чел·ч);

N – количество людей в помещении.

Для лабораторий нормативный воздухообмен на 1 человека в производственных помещениях с естественным проветриванием составляет 30 м³/(чел·ч) [91], в лаборатории 101 НОЦ Б.П. Вейнберга Томского

политехнического университета постоянно находятся 7 человек, однако в лаборатории также регулярно пребывают студенты, поэтому рассчитаем воздухообмен для 15 человек.

$$L = 30 \cdot 15 = 450 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (6.12)$$

Следовательно кратность воздухообмена равна

$$K_v = \frac{450}{509,68} \approx 0,88 = 1. \quad (6.13)$$

Подберем систему кондиционирования со следующей производительностью

$$L = 1 \cdot 509,68 = 510 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (6.14)$$

В лаборатории 101 НОЦ Б.П. Вейнберга был выбран вентилятор «ФЬОРДИ ВПУ-800» с производительностью 750 м³/ч [92].

6.2.2 Анализ опасных факторов

1. Химическое воздействие на организм

При работе на ионно-плазменной установке в качестве рабочего газа используется аргон, который является нетоксичным газом и не оказывает опасного воздействия на окружающую среду и человека. Аргон тяжелее воздуха и может накапливаться в слабо проветриваемых помещениях у пола. При этом снижается содержание кислорода в воздухе, что оказывает удушающий эффект.

В таблице 6.5 приведены характеристики веществ, используемых при работе на ионно-плазменной вакуумной установке, их характеристики, воздействие данных веществ на человека, а также меры оказания первой медицинской помощи при проявлении признаков гипоксии от данных веществ. Для обеспечения безопасности при работе на вакуумной установке используются следующие технические способы и средства коллективной и индивидуальной защиты:

- вытяжная вентиляция;

- дополнительная вентиляция над камерой;
- средство защиты глаз;
- средства защиты органов дыхания (защитная маска, респираторы).

Также персонал должен быть обеспечен спецодеждой, например: халатом х/б, резиновыми перчатками, спецобувью [93].

Таблица 6.5 – Характеристики веществ, используемых при работе на ионно-плазменной установке, их воздействие на человека и меры оказания первой медицинской помощи при проявлении признаков гипоксии от данных веществам.

Наименование	Характеристика	ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м³	Класс опасности	Оказание первой медицинской помощи при отравлении
Аргон	Газ без цвета и запаха	0,1-1,0	4 класс (малоопасное вещество) [94]	Свежий воздух, покой. Обратиться за медицинской помощью.
Азот	Газ без цвета и запаха	Более 10,0	4 класс (малоопасное вещество) [95]	Свежий воздух, покой. Обратиться за медицинской помощью.

2. Электробезопасность

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного взаимодействия электрического тока и электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности. Безопасным для

организма человека можно считать переменный ток силой не выше 0,05 А ток силой более 0,05 - 0,1 А опасен и может вызвать смертельный исход.

Безопасным напряжением для человека считается напряжение 42 В в нормальных условиях и 12 В в условиях повышенной опасности (сырость, высокая температура, металлические полы и др.). Согласно [89] помещения по электробезопасности помещения классифицируются как:

- без повышенной опасности (с номинальным напряжением до 1000 В);
- с повышенной опасностью (с номинальным напряжением до 1000 В и с присутствием агрессивной среды);
- особо опасные (с номинальным напряжением свыше 1000 В).

Источником опасности в помещении лаборатории 101 является ионно-плазменная установка. Так как поражение электрическим током может произойти при прикосновении к токоведущим частям, находящимся под напряжением, на которых остался заряд или появилось напряжение.

Лаборатория относится ко второму классу «Помещение с повышенной опасностью», так как в данном помещении имеется угроза поражения электротоком при косвенном касании токоведущих элементов. Граничные значения напряжений, при повышении которых требуется выполнение защиты от косвенного прикосновения для помещений с повышенной опасностью составляет >25 В переменного тока и >60 В постоянного тока [90].

Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия [90]:

1. содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами;
2. своевременно проводить техническое обслуживание;
3. соблюдать технику безопасности при работе с оборудованием;
4. проводить инструктаж для работников.

В качестве мероприятий по обеспечению безопасности работы с электрооборудованием могут быть использованы [90]:

1. изоляция токоведущих частей;

2. малое напряжение в электрических цепях;
3. защитное заземление, зануление, защитное отключение;
4. применение разделяющих трансформаторов;
5. использование оболочек и блокировок для предотвращения возможности случайного прикосновения к токоведущим частям и ошибочных действий или операций;
6. защитные средства и предохранительные приспособления.

6.3 Пожаро-взрывобезопасность

Пожар – неконтролируемое горение вне специального очага, наносящее материальный ущерб и способное вызвать травмы и гибель людей.

Согласно [96] выделяют следующие опасные факторы пожара.

1. Открытый огонь и искры;
2. повышенная температура окружающей среды;
3. токсичные продукты горения полимерных материалов;
4. пониженная концентрация кислорода;
5. дым;
6. обрушение конструкций.

Помещения подразделяются на категории А, Б, В1 – В4, Г и Д, а здания – на категории А, Б, В, Г и Д [97]. Определение категорий помещений осуществляется путем последовательной проверки принадлежности помещения к категориям от высшей (А) к низшей (Д). К пожароопасной категории В следует относить помещения, в технологическом процессе которых находятся или обращаются горючие материалы, при этом уровень пожарной опасности учитывается введением пожарной нагрузки и устанавливается дифференцированной классификацией (таблица 6.6).

Таблица 6.6 – Классификация помещений по степени их пожаровзрывоопасности

Категория	Характеристика веществ и материалов помещения, находящихся (образующихся) в помещении
А	Горючие газы (ГГ), легковоспламеняющиеся взрывопожароопасные жидкости (ЛВЖ) с температурой вспышки не более 28°С в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные парогазовоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа.
Б	Горючие пыли или волокна, ЛВЖ взрывопожароопасные с температурой вспышки более 28°С, горючие жидкости (ГЖ) в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные пылевоздушные или паровоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа.
В1-В4	ГЖ и трудногорючие жидкости, твердые пожароопасные горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), веществ и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых они имеются в наличии или обращаются, не относятся к категориям А или Б.
Г	Негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени; ГГ, ГЖ и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива.
Д	Негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

Причинами, которые могут вызвать пожар, являются [97]:

1. неисправность электропроводки и приборов;
2. короткое замыкание;
3. перегрев аппаратуры;
4. молния.

Для предотвращения возникновения возгорания следует придерживаться мер безопасности:

1. в течении проведения работ содержать в порядке и чистоте рабочее место;
2. не закрывать вентиляционные отверстия ПЭВМ;
3. не допускать попадания влаги на поверхности устройств;
4. не переключать разъемы сетевых (220В) кабелей;
5. не производить вскрытие ПЭВМ.

Приведём классификацию пожароопасных зон (таблица 6.7).

Таблица 6.7 – Классификация взрывоопасных зон [97]

Класс	Характеристика помещения
П-I	зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются горючие жидкости с $T_{всп.}$ выше 61°C .
П-II	зоны, расположенные в помещениях, в которых выделяются горючие пыль или волокна с НКПВ более 65 г/м^3 к объему воздуха.
П-IIa	зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются твердые горючие вещества.
П-III	расположенные вне помещений зоны, в которых обращаются горючие жидкости с $T_{всп.}$ выше 61°C или твердые горючие вещества

Лаборатория 101 научно-образовательного центра им. Б.П. Вейнберга относится к категории помещения В4, удельная пожарная нагрузка в котором составляет $1 - 180 \text{ мДж/м}^2$. Лаборатория 101 научно-образовательного центра им. Б.П. Вейнберга относится к П-IIa классу.

6.3 Анализ вероятных чрезвычайных и аварийных ситуаций

В данном помещении используются (обрабатываются) негорючие вещества и горючие газы, жидкости и твердые вещества. Также в данном помещении расположены баллоны с инертными и реакционными газами (азот, аргон). В таблице 6.8 приведены возможные чрезвычайные ситуации (ЧС), которые могут возникнуть в лаборатории 101 НОЦ Б.П. Вейнберга, меры предосторожности, меры по ликвидации последствий ЧС.

Таблица 6.8 – Возможные чрезвычайные ситуации (ЧС) и аварийные ситуации (АС), которые могут возникнуть в лаборатории 101 НОЦ Б.П. Вейнберга, меры по предосторожности, меры по ликвидации последствий

№	Тип АС и ЧС	Меры предосторожности	Меры по ликвидации последствий АС и ЧС
1	Возникновение пожара	<ul style="list-style-type: none"> – использование только исправного оборудования; – проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности; – отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ. 	<ul style="list-style-type: none"> – вызвать пожарный расчет (тел. 01, моб. 101, 112); – отключить электропитание, выключить вентиляцию; – закрыть двери и окна, чтобы убрать доступ кислорода для горения; – воспользоваться первичными средствами пожаротушения (огнетушитель ВП, УК или П) или песком. При невозможности – начать эвакуацию людей из помещения;

			– сообщить о пожаре администрации лаборатории и института.
2	Удушение человека или взрыв в результате разгерметизации газовых баллонов, повлекшая за собой	– проведение периодических инструктажей по работе с газовыми баллонами; – устанавливать баллоны вертикально и на расстоянии не менее 1 метра от радиаторов и не менее 5 метров от источников тепла с открытым огнём [98].	– покинуть помещение, оставив включенной вентиляцию до полного исчезновения запаха; – вызвать МЧС (моб. 112).
3	Электроожоги вследствие пожара от короткого замыкания в цепях электропитания оборудования	– проведение периодических инструктажей по электробезопасности; – содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативнотехническими документами	– обесточить ионноплазменную установку, переместив в нижнее положение ручку рубильника; – отключить подачу водохлаждения; – вызвать МЧС (моб. 112).

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, находящихся под высоким давлением описаны в [98]. В целях обеспечения пожарной безопасности, необходимо выполнение общих требований:

1. К работе в лаборатории допускаются лица, прошедшие инструктаж по противопожарной безопасности;
2. Ответственным за противопожарную безопасность является руководитель лаборатории;
3. Средства пожаротушения (огнетушители, находящиеся в каждой комнате лаборатории) должны быть в постоянной готовности и проходить своевременную техническую проверку;
4. В лаборатории должен быть план эвакуации работников в случае пожара;
5. В целях предупреждения ожогов запрещается курить, пользоваться открытым огнем, применять электронагреватели открытого исполнения и с несгораемым основанием;
6. Легко испаряющиеся горючие жидкости должны храниться в плотно закрытых сосудах, вдали от нагревательных приборов, в специально отведенных местах;
7. Уметь пользоваться средствами пожаротушения и своевременно применять их;
8. Уходя из лаборатории, отключать свет;
9. В случае возникновения пожара звонить по телефону 01, сообщить о случившемся администрации университета, одновременно принять меры к ликвидации пожара с помощью первичных средств огнетушения (огнетушители), находящихся в корпусе.

Вывод по разделу «Социальная ответственность»

В данном разделе были рассмотрены вредные и опасные факторы при эксплуатации экспериментальной ионно-плазменной установки, а именно: повышенный уровень шума [81]; освещение [82]; микроклимат [84], электробезопасность [89]; повышенная пожаро-взрывоопасность [97].

Помещение 101 НОЦ им. Б.П. Вейнберга отнесено:

– по электробезопасности к классу помещения с повышенной опасностью [89];

– по пожаровзрывоопасности к категории В4 [97].

Приведены возможные чрезвычайные ситуации (ЧС), которые могут возникнуть в лаборатории 101 НОЦ Б.П. Вейнберга, меры по предосторожности, меры по ликвидации последствий ЧС.

Заключение

В настоящей выпускной квалификационной работе рассмотрено влияние ионного ассистирования на свойства хромовых покрытий при высокоскоростном магнетронном распылении.

1. Исследование кристаллической структуры покрытий показало, что при ионном ассистировании направление роста Cr покрытий изменяется с (110) на (211).
2. Микроструктурный анализ хромовых покрытий показал, что при высокоскоростном осаждении образуется столбчатая структура, в то время как при ионном ассистировании покрытие становится более плотным.
3. Уплотнение микроструктуры хромовых покрытий при ионном ассистировании позволяет увеличить твёрдость покрытий в 1,4-2,0 раза.
4. В результате адгезионных испытаний выяснилось, что при ионном ассистировании адгезия хромового покрытия со сталью уменьшается.
5. Износостойкость покрытий как при высокоскоростном осаждении, так и при ионном ассистировании увеличивается за счет повышения твёрдости.
6. Уплотнение микроструктуры хромовых покрытий при ионном ассистировании позволяет увеличить их коррозионную стойкость, так как плотность тока коррозии уменьшается с 27,5 до $3,6 \cdot 10^{-9}$ А/см².

Исследованный подход применим для компенсации ухудшения функциональных характеристик хромовых покрытий при высокоскоростном магнетронном распылении.

Список используемой литературы

1. Григорьева, И. О. Технология гальванических металлических покрытий: учебное пособие / И. О. Григорьева, Ж. В. Межевич, А. Ф. Дресвянников. — Казань.: КНИТУ, 2019. — 284 с.;
2. Выбор и применение материалов: учебное пособие: в 5 томах / под редакцией Н. А. Свидуновича. — Минск: Белорусская наука, 2019 — Том 3: Выбор и применение специальных сталей и сплавов, 2019. — 529 с.;
3. Груба, О.Н. Повышение эффективности процесса электролитического хромирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. — 2022. — № 1. — С. 114-124.;
4. Блюменштейн, В. Ю. Способы восстановления деталей и процессы реновации машин : учебное пособие / В. Ю. Блюменштейн, М. С. Махалов. — Кемерово: КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2016. — 139 с.;
5. Brauer, G. Magnetron sputtering – Milestones of 30 years / G. Brauer, B. Szyszka, M. Vergohl, R. Vандorf // Vacuum. – 2010. – Vol. 84. – P. 1354–1359.;
6. Берлин Е. В., Сейдман Л.А. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением // Техносфера, 2014. - с. 141.;
7. G.A. Bleykher, A.V. Yuryeva, A.S. Shabunin, D.V. Sidelev, V.A. Grudin, Yu.N. Yuryev, The properties of Cu films deposited by high rate magnetron sputtering from a liquid target // Vacuum. – Volume 169. – 2019.;
8. Dmitrii V. Sidelev, Galina A. Bleykher, Valeriy P. Krivobokov, Zhanumgyl Koishybayeva, High-rate magnetron sputtering with hot target // Surface and Coatings Technology. – Volume 308. – 2016. – P. 168-173.;
9. D. Mercks, F. Perry, A. Billard, Hot target sputtering: A new way for high-rate deposition of stoichiometric ceramic films // Surface and Coatings Technology. – 2006. – P. 2276-2281.;
10. J. Vlcek, B. Zustin, J. Rezek, K. Burcalova, J. Tesar Pulsed magnetron sputtering of metallic films using a hot target // 52nd Annual Technical Conference Proceedings of the Society of Vacuum Coaters. – 2009. – P.219-223.;

11. Кривобоков В.П., Жуков В.В., Янин С.Н., Распыление мишени при ассистировании магнетронного разряда ионным пучком. // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307.;
12. V. Stranak, Z. Hubicka, M. Cada, R. Bogdanowicz, H. Wulff, C.A. Helm, R. Hippler, Influence of reactive oxygen species during deposition of iron oxide films by high power impulse magnetron sputtering, J. Phys. D.: Appl. Phys. – 2018.;
13. V. Stranak, A.-P. Herrendorf, S. Drache, M. Cada, Z. Hubicka, M. Tichy, R. Hippler, Highly ionized physical vapor deposition plasma source working at very low pressure, Appl. Phys. Lett. 100. 2012.;
14. Мифтахутдинов, А. В. Токсикологическая экология: учебник / А. В. Мифтахутдинов. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург: – Лань, 2022. — 308 с.;
15. J. Lin, I. Dahan, Surf. Coat. Technol. – 2015. – P. 154-159.;
16. Лякишев, Н. П. Металлургия ферросплавов: учебное пособие / Н. П. Лякишев, М. И. Гасик, В. Я. Дашевский. — Москва: МИСИС, [б. г.]. — Часть 1: Металлургия сплавов кремния, марганца и хрома. — 2006. — 85 с.;
17. Кириллов, В. В. Неорганическая химия. Свойства элементов и их соединений / В. В. Кириллов. — Санкт-Петербург: Лань. - 2023. — 380 с.;
18. Гончаров, В. С. Методы упрочнения конструкционных материалов. Функциональные покрытия: учебное пособие / В. С. Гончаров. — Тольятти: ТГУ. – 2017. — 205 с.;
19. Груба, О.Н. Повышение эффективности процесса электролитического хромирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. — 2022. — № 1. — С. 114-124.;
20. Шрайер Л.Л. Коррозия. Справочник // Вальков З. Д., Гладышев В. М., Калинин В. Д., Поздеев П. П.;
21. Дунюшкина Л.А. Введение в методы получения пленочных электролитов для твердооксидных топливных элементов: монография / Л.А. Дунюшкина. – Екатеринбург: УРО РАН. – 2015. – 15 с.;

22. Иванов, Н. Б. Нанотехнологии материалов и покрытий: учебное пособие / Н. Б. Иванов, Н. А. Покалюхин. — Казань: КНИТУ. — 2019. — 236 с.;
23. Mayra Cruz, Sandra E. Rodil, Improving the corrosion resistance of aluminum alloy (AA7075) using amorphous chromium oxide coatings // *Materials Letters* 278. — 2020.;
24. Xiahe Liu, Laibin Wang, Mei Wang, Fenghua Li, Junjie Gao, Jiawei Li, Dynamic structures and electrochemical behavior during the formation of trivalent chromium-based conversion coating on Zn // School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China *Surface and Coatings Technology*. — 2022.;
25. G.D. Wilcox, Institute of Polymer Technology and Materials Engineering, Loughborough University, Loughborough, Leicestershire, Replacing Chromates for the Passivation of Zinc Surfaces // *The International Journal of Surface Engineering and Coatings*. — 2003.;
26. Кудрявцев Н.Т. Электролитические покрытия металлами. М. *Металлургия*. — 1979.;
27. Михеев, А. Е. Теория и технология упрочнения материалов и нанесения покрытий: учебное пособие / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Д. В. Раводина. — Красноярск: СибГУ им. академика М. Ф. Решетнёва. — 2021. — 120 с.;
28. Кузнецов, В. Г. Новые конструкционные материалы: учебное пособие / В. Г. Кузнецов, Г. А. Аминова. — Казань: КНИТУ. — 2020. — 472 с.;
29. Шурыгина, Л. И. Основы теории физико-химических процессов в гетерогенных системах: учебное пособие / Л. И. Шурыгина, Э. П. Суровой, Л. Н. Бугерко. — Кемерово: КемГУ. — 2015.;
30. Методы термического испарения [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://studfile.net/preview/2524640/page:2/> ;

31. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, М. Л. Хейфец, С. А. Чижик. – 2011. — 283 с.;
32. Михеев, А. Е. Теория и технология упрочнения материалов и нанесения покрытий: учебное пособие / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Д. В. Раводина. — Красноярск: СибГУ им. академика М. Ф. Решетнёва. – 2021. — 120 с.;
33. Берлин, Е. В. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением: справочное пособие / Е. В. Берлин, Л. А. Сейдман. — Москва: Техносфера. – 2014. — 256 с.;
34. Современные способы упрочнения поверхности и технологии нанесения покрытий // [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://helpiks.org/7-54967.html>;
35. Tianguo Wei, Ruiqian Zhang, Hongyan Yang, Hong Liu, Shaoyu Qiu, Yu Wang, Peinan Du, Kun He, Xiaogang Hu, Chuang Dong, Microstructure, corrosion resistance and oxidation behavior of Cr-coatings on Zircaloy-4 prepared by vacuum arc plasma deposition // Corrosion Science, Volume 158. – 2019.;
36. Технологические особенности вакуумной металлизации // О материалах// [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://masterieltonline.ru/o-materialah/tehnologiya-vakuumnogo-napyleniya.html>;
37. Dunyushkina L. A. Introduction to methods for obtaining film electrolytes for solid oxide fuel cells: monograph. - 2015. – P.126;
38. Petukhov V. Yu., Gumarov G. G. Ion-beam methods for obtaining thin films // Educational and methodological manual for students of the Faculty of Physics. - К.: Edition 2-е, corrected and supplemented. – 2010. – 87 p.;
39. O.V. S b l', A.A. Andreev, S. . Gr g r ev, e al. Physcal characteristics, structure and stress state of vacuum-arc tin coating, deposition on the substrate when applying high-voltage pulse during the deposition // Problems of Atomic Science and Technology. – 2011. – P. 174-177.;

40. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 72 с.;
41. В.П. Кривобоков, Н.С. Сочугов, А.А. Соловьев, Плазменные покрытия (методы и оборудования): учебное пособие/ - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008 – с 59.;
42. Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы: устройство, принципы работы, применение – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 54 с.;
43. В.Н. Полковников, MAGNETRON DEPOSITION FACILITIES / Лаборатория рентгеновской оптики: 2018. // [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://xray-optics.org/equipment/installation-magnetron-sputtering/>;
44. В.И. Баранов, Технология напыления тонких пленок // [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberpedia.su/15x32ab.html>;
45. Кузьмичев А.И. Магнетронные распылительные системы. Кн.1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. – К.: Аверс, 2008. – 9 с.;
46. Welty, Magnetron sputtering cathode // U.S. patent number 4,892,633 [Application Number 07/336,243].;
47. А.П. Достанко, Д.А. Голосов, С.Н. Мельников, С.М. Завадский, М.В. Ермоленко, Д.Э. Окоджи, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Увеличение коэффициента использования материала мишени при магнетронном распылении, Минск, 220013, 11-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 23-25 сентября 2015 г.;
48. Кривобоков, В. П. Плазменные покрытия (методы и оборудование): учебное пособие / В. П. Кривобоков, Н. С. Сочугов, А. А. Соловьев. — Томск: ТПУ, 2011. — 70 с.;
49. С.В. Тимаков, А.В. Хошев, Д.Е. Макушкин, А.С. Храмов, Анализ свойств тензорезистивных пленок «хром - никель» синтезированных

распылением из независимых источников // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017 год №2 (20), - с. 55-59.;

50. Jyh-Wei Lee, Yu-Chu Kuo, Chaur-Jeng Wang, Li-Chun Chang, Kuan-Ting Liu, Effects of substrate bias frequencies on the characteristics of chromium nitride coatings deposited by pulsed DC reactive magnetron sputtering // Surface and Coatings Technology. – December 2008. – P. 721-725.;

51. D. Mercks, F. Ferry, A. Billard Hot target sputtering: a new way for high-rate deposition of stoichiometric ceramic films Surf. Coat. Technol., 201. – 2006. – P. 2276-2281.;

52. J. Musil, V. Satava, P. Baroch High-rate reactive deposition of transparent SiO₂ films containing low amount of Zr from molten magnetron target // Thin Solid Films, 519. - 2010. – P. 775-777.;

53. V.A. Grudin, G.A. Bleykher, D.V. Sidelev, V.P. Krivobokov, M. Bestetti, A. Vincenzo, S. Franz, Chromium films deposition by hot target high power pulsed magnetron sputtering: deposition conditions and film properties // Surf. Coat. Technol. 375. –2019. – P. 352–362.;

54. B.S. Danilin, M.V. Kakurin, V.E. Minaychev, V.V. Odinkov, V.K. Syrchin Deposition of metal coatings by magnetron sputtering from liquid target // Elektronnaya Tekhnologiya, 72 – 1978. – P.84-87.;

55. G.A. Bleykher, V.P. Krivobokov, A.V. Yuryeva Magnetron deposition of coatings with evaporation of the target // Tech. Phys., 60. - 2015, P. 1790-1795

56. G.A. Bleykher, A.O. Borduleva, A.V. Yuryeva, V.P. Krivobokov, J. Lančok, J. Bulíř, J. Drahoukoupil, L. Klimša, J. Kopeček, L. Fekete, R. Čtvrtlík, J. Tomaščík Features of copper coatings growth at high-rate deposition using magnetron sputtering systems with a liquid metal target // Surf. Coat. Technol., 324. – 2017. – P. 111-120.;

57. G.A. Bleykher, A.O. Borduleva, V.P. Krivobokov, D.V. Sidelev Evaporation factor in productivity increase of hot target magnetron sputtering system // Vacuum. –2016. – P. 62-69.;

58. D.V. Sidelev, G.A. Bleykher, M. Bestetti, V.P. Krivobokov, A. Vicenzo, S. Franz, M.F. Brunella A comparative study on the properties of chromium coatings deposited by magnetron sputtering with hot and cooled target Vacuum. –2017. – P.479-485.;

59. U.S. Environmental protection agency. Chromium Compounds. Hazard summary. URL: <http://www.epa.gov/ttn/atw/hlthef/chromium.html>

60. ГОСТ 9.305-84 Покрытия металлические и неметаллические неорганические [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200007401>;

61. Голицын Вячеслав Алексеевич Износостойкость хрома, электроосажденного анодно-струйным способом // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2010.;

62. A. Aubert, R. Gillet, A. Gaucher, J.P. Terrat, Hard chrome coatings deposited by physical vapour deposition // Thin Solid Films. – 1983. – P.165-172.;

63. D.V. Sidelev, G.A. Bleykher, V.P. Krivobokov, Zh Koishybayeva High-rate magnetron sputtering with hot target Surf. Coating. Technol. –2016. – P.168-173.;

64. Грудинин В. А., Высокоскоростное осаждение покрытий на основе соединений хрома и азота с использованием плазмы магнетронных распылительных систем: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2022.

65. Курзина И.А. К93 Рентгенофазовый анализ нанопорошков. Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Отрасли nanoиндустрии. Области 107 применения наноматериалов» для магистрантов, обучающихся по направлению 150600 «Материаловедение и технология новых материалов» / сост. Курзина И.А., Годымчук А.Ю., Качаев А.А. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2010. – 14 с.;

66. Hitachi S-3400N Trowbridge Hall - Room B21H [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cmrf.research.uiowa.edu/hitachi-s-3400n>;

67. Нанотвердомер NHT2 – Первый сертифицированный Нанотвердомер в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lab-nnz.ru/nanotverdomer-nht2-pervyj-sertificirovannyj-nanotverdomer-v-rossii/>;

68. Прибор для измерения адгезионной прочности покрытий: [Электронный ресурс] // Корпоративный портал ТПУ - Режим доступа: http://portal.tpu.ru:7777/departments/centre/cism_fti/tech_base/microscratch;

69. Tengfei Zhang, Haiyan Liao, Weijiu Huang, Haibo Ruan, Yongyao Su, Xusheng Yang, Zhaoying Xu, Shangyi Yin, Jinbiao Wang, High temperature steam oxidation behavior of textured Cr coatings with different grain structures, Surface and Coatings Technology. – Volume 459. – 2023.;

70. Patterson, A.L. The scherrer formula for X-ray particle size determination. Phys. Rev. – 1939.;

71. S.J. Bull, E.G. Berasetegui, An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing, Tribol. Int. 39. – 2006. – P. 99–114.;

72. Abadias, G.; Chason, E.; Keckes, J.; Sebastiani, M.; Thompson, G.B.; Barthel, E.; Doll, G.L.; Murray, C.E.; Stoessel, C.H.; Martuni, L. Review Article: Stress in thin films and coatings: Current status, challenges, and prospects. J. Vac. Sci. Technol. A. – 2018.;

73. ASTM G102-89; Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information From Electrochemical Measurements. – 2004.;

74. Stockemer, J.; Winand, R.; Vanden Brande, P. Comparison of wear and corrosion behaviors of Cr and CrN sputtered coatings. // Surf. Coat. Technol. 1999. – 115. – 230–233.;

75. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.;

76. Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 11 декабря 2020 г. № 887н “Об утверждении правил по охране труда при обработке металлов”.;

77. ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.;

78. ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).;

79. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года).;

80. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.;

81. ГОСТ 12.1.003–83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.;

82. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение». Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*.;

83. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность».;

84. СанПин 2.2.4.548-96. «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».;

85. ГОСТ 12.1.004-85 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.;

86. Спиральный вакуумный насос Anest iwata ISP-250C [Электронный ресурс] // Интернет-магазин «Вакуум-маркет» URL <https://vacuum-market.ru/catalog/vakuumnye-nasosy/spiralnye/anest-iwata-isp-250s/>;

87. СН 2.2.4/2.8.1.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.;

88. Светильник ALS.OPL 418 HF ES1 [Электронный ресурс] // Интернет-магазин «ЭТМ» URL: <https://www.etm.ru/cat/nn/2423476>;

89. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.;

90. ГОСТ 12.1.085-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.;

91. СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование».;

92. Приточная установка ФЬОРДИ ВПУ-800/12 кВт/3 (380В) [Электронный ресурс] // Интернет-магазин «Благовест» URL: https://blagovest.ru/catalog/ventilyatsionnye_ustanovki/pritochnye_ustanovki/fordi_vpu/pritochnaya_ustanovka_fordi_vpu_800_12_kvт_3_380v/;

93. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.;

94. ГОСТ 10157-2016 Аргон газообразный и жидкий. Технические условия.;

95. ГОСТ 9293-74 Азот газообразный и жидкий. Технические условия.;

96. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.;

97. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывоопасной и пожарной безопасности.;

98. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Инструкция по охране труда при хранении и эксплуатации газовых баллонов [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://docs.cntd.ru/document/1200039245>.